DE LAS PROFUNDIDADES DE LA TIERRA A LAS PROFUNDIDADES DEL SISTEMA SOLAR

INVESTIGACION y CIENCIA

ENERO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Colisión estelar

Células dendríticas

Gladiadores: un nuevo orden de insectos

Reglas del mundo cuántico

Procesos electrónico-vibracionales

Terrorismo radiactivo

La lengua originaria de los europeos prehistóricos

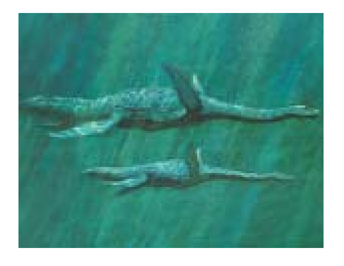




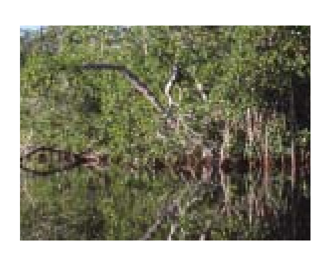
Enero de 2003 Número 316

SECCIONES

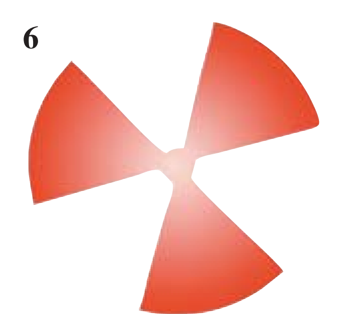














Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Armas radiactivas*, *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas,*; M.ª Rosa Zapatero: *Colisiones estelares*; Esteban Santiago: *El largo brazo del sistema inmunitario*; Xavier Bellés: *Gladiadores: un nuevo orden de insectos*; Ramón Pascual: *Reglas para un mundo cuántico complejo*; Juan Acordagoicoechea: *La lengua originaria de los europeos prehistóricos*; Teodoro Vives: *De las profundidades de la tierra a las profundidades del sistema solar*; A. Garcimartín: *Nexos*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*



Portada: Don Dixon

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

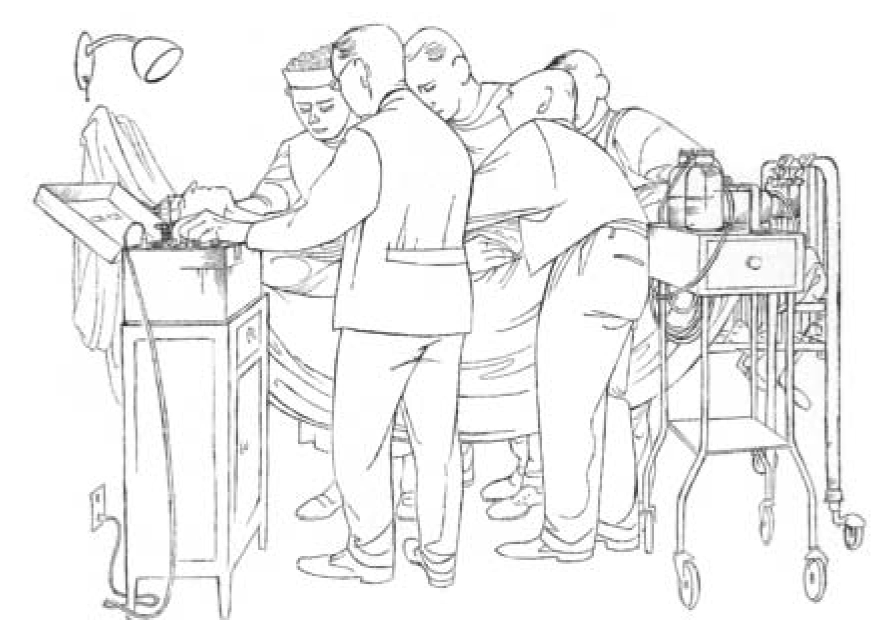
Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

RADIOTELESCOPIOS. «Conforme se ha ido trazando el mapa del firmamento con mayor detalle gracias a radiotelescopios de creciente poder separador, ha resultado más patente que las regiones con mayores concentraciones de estrellas generan las radioondas más intensas. Incluso en nuestro presente estado de incertidumbre acerca del origen de las radioondas, esa ligazón es de la mayor importancia para la astronomía. Las investigaciones precisan de un poder separador muy alto y ello requiere radiotelescopios de gran tamaño. El nuevo telescopio del observatorio de Jodrell Bank, de la Universidad de Manchester, se basa en el radiotelescopio que allí lleva en uso varios años, pero será mucho mayor y podrá apuntarse a cualquier porción del firmamento.»

TRATAMIENTO DE LA ESQUIZOFRENIA. «Ante lo abrumador del problema, hoy la mayoría de los psiquiatras se inclina por recurrir a los tratamientos, rápidos y drásticos, desarrollados durante los últimos veinte años, es decir, tratamientos de choque de tipos diversos (con electricidad, metrazol, insulina, anhídrido carbónico) o la lobotomía prefrontal. Aunque producen unos efectos inmediatos espectaculares, tras años de experiencia parece ahora claro que sólo son temporales; una gran proporción de los pacientes recae tarde o temprano. En los últimos diez años hay cada vez más psiquiatras, especialmente los más jóvenes, que tratan la esquizofrenia con psicoterapia. En años recientes se ha demostrado que, contrariamente a la primera conclusión de Freud, es posible conseguir una relación de transferencia aprovechable entre un esquizofrénico y su terapeuta. El tratamiento dura al menos dos años, y con frecuencia más; resulta incomparablemente más caro que el rápido método de los tratamientos de choque.»



El tratamiento de choque de la esquizofrenia pierde aceptación, 1953

...cien años

PRODIGIO INALÁMBRICO. «Desde un árido promontorio situado en las costas de levante de Cabo Bretón (Canadá), pocos días antes de Navidad, Guglielmo Marconi intercambió, gracias a la telegrafía sin hilos, mensajes de felicitación con algunas de las cabezas coronadas de Europa. Que el brillante joven anglo-italiano esté hoy preparado para transmitir mensajes comerciales de un lado a otro del Atlántico debe considerarse sin duda como el logro científico más notable del año.»

UTIL PARA BORRACHOS. «En la Feria de los Tenderos de Londres se ofreció un premio de 250 libras por una lámpara de keroseno que no presentase peligro, esto es, para quienes emplean las lámparas cual proyectiles. El deseo de los directores era conseguir una lámpara barata, que pudiera venderse hasta en los distritos más pobres y usarse con la máxima seguridad. Uno de los problemas más graves de Londres era proteger de sí mismos a los afligidos de embriaguez. Era su deseo dar con una lámpara que, arrojada por un borracho a su mujer o a sus hijos, se apagase automáticamente, de modo que el individuo, aunque por desgracia lastimase a su esposa, no quemara a la vez la casa y prendiera fuego a los hijos.»

...ciento cincuenta años

FRUTOS DE LA INDUSTRIA. «El *Providence Journal* (Rhode Island) se lamenta, con voz pesarosa, del desordenado avance del lujo: ‘La suma hoy necesaria para que una joven pareja se instale en un hogar habría resultado una fortuna para sus abuelos. Los muebles, la vajilla y las insensatas fruslerías con las que toda recién casada piensa que debe decorar su casa, puestos a interés en valores bancarios, equivaldrían a una hermosa previsión ante los desastres financieros. El gusto por muebles ostentosos es de lo peor y más vulgar. Quien no prefiera el tictac del reloj de pared tras la puerta antes que un ampuloso reloj de repisa francés en cada habitación de su casa, no merece saber la hora del día.’ Aunque estamos de acuerdo con algunas de sus observaciones, disentimos de otras. Nos agrada el progreso en la edificación, en el vestir y en todo lo que no sea inmoral.»

APUNTES

OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA

Falsos ataques nucleares

Un asteroide con una envergadura de 25 a 50 kilómetros borraría de la faz de la Tierra a casi toda la especie humana. El mismo daño podría hacer una piedra espacial de sólo cinco o diez metros de diámetro si alguna nación presta a apretar el gatillo confundiese su caída con un ataque nuclear. El general de las Fuerzas Aéreas Simon P. Worden renovó esta vieja preocupación en una comparecencia ante un subcomité del Congreso de los Estados Unidos. Reveló que un meteorito así ardió sobre el Mediterráneo el 6 de junio de 2002, justo cuando la tensión entre la India y Pakistán, potencias nucleares ambas, estaba en lo más alto. Los satélites de alerta temprana divisaron el destello producido por la entrada de la roca, que generó una explosión comparable a la de Hiroshima. Si hubiese ingresado en la atmósfera a la misma latitud, pero unas horas antes, quizá hubiera caído sobre la frontera entre la India y Pakistán y se lo habría confundido con una detonación nuclear. Se han analizado los datos de los satélites: unos trescientos meteoritos con un diámetro entre el metro y los diez metros estallaron en la atmósfera superior en los últimos ocho años.



—Charles Choi



Una estrella fugaz prodría ser confundida con la explosión de una cabeza nuclear

FISICA

Hielo que se hunde

Imagine unos cubos de hielo que, en vez de subir a la superficie, se hundiesen como piedras al echarlos en un vaso de agua. Altas presiones y temperaturas de casi –200 grados pueden formar un hielo así, un 25 % más denso que el agua líquida (el hielo ordinario es alrededor de un 8% menos denso que el agua). Unos científicos británicos y australianos han establecido con haces de neutrones que, a diferencia del hielo normal, éste tan denso es amorfo, como el vidrio y la mayor parte del agua helada del universo. Se trata de la quinta forma de hielo amorfo descubierta (por trece tipos de agua cristalina). Si se supiese mejor cómo quedan las moléculas atrapadas en esas estructuras, cabría explicar el comportamiento de los sistemas desordenados en general y en particular el del agua en sistemas que mantienen formas de vida con fríos extremos. Quizá hasta se verificase la hipótesis de que existe una segunda forma de H_2O. *—Charles Choi*

PALEONTOLOGIA

Las aletas de los plesiosaurios

Durante el Mesozoico, mucho antes de que las ballenas se enseñoreasen de los mares, unos reptiles marinos, los plesiosaurios, eran los gigantes oceánicos. Hace mucho que se quiere saber cómo capturaban sus presas estos animales, cuya morfología hace pensar en un cruce de jirafa y tortuga. Se creía que los plesiosaurios de cuello más corto y cabeza mayor, los pliosauromorfos, estaban capacitados para las persecuciones a gran velocidad, mientras que a los plesiosauromorfos, de cuello más largo y cabeza menor, se les daba mejor cazar emboscados.

F. Robin O'Keefe ha estudiado la geometría de las aletas de aquellos reptiles. Ha determinado que la baja razón entre largo y ancho de las aletas de los pliosauromorfos optimizaba la maniobrabilidad y el ataque —como las alas cortas y corpulentas de los halcones y los cazas—, virtudes oportunas para dar alcance a presas veloces. Pero las aletas de los plesiosauromorfos tenían una razón de largo y ancho alta, comparable a la de las alas más largas y finas de las gaviotas y los bombarderos, idóneas para los vuelos de larga distancia. O'Keffe sostiene, pues, que los plesiosauromorfos no debían de andar al acecho, sino que navegaban trechos muy largos en busca de presas menores y no tan escurridizas.



—Kate Wong



Los plesiosaurios reinaron en los mares del Mesozoico

P. PARVIAINEN *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); RICK SARDINHA (*abajo*)

INFORMATICA

Teclados virtuales



Un teclado virtual de luz

Se puede ya manejar un ordenador o cualquier otro dispositivo electrónico personal con un teclado de luz proyectado sobre una mesa. Se basa en un procedimiento de identificación de movimientos tridimensionales, tarea para la que antes se empleaban dos cámaras; las imágenes que captaban se comparaban píxel a píxel. Los ingenieros Nazim Kareemi, Cyrus Bamji y Abba Rafii han presentado en septiembre de 2002 un teclado virtual, el "teclado integrado Canesta" —ése es el nombre de la firma que han creado—, con una unidad de percepción del tecleado que no actúa de esa manera. Consta del proyector de teclado —utiliza un láser de nueve milímetros de lado—, de una fuente de infrarrojos y de un sensor. La fuente, cilíndrica, de 6,5 milímetros de diámetro, emite un haz de luz infrarroja que rebota en los objetos y vuelve al sensor, una batería de cien por veinte píxeles fotosensibles no mayor que un guisante. Cuando se enciende la luz, se pone en marcha un cronómetro en cada píxel, que se detiene cuando vuelve la luz. El tiempo se convierte en distancias, las recorridas por la luz antes de incidir en algo, por ejemplo un dedo que toca una de las teclas virtuales. La colección de distancias proporciona un mapa tridimensional del área barrida, cosa que el dispositivo hace más de 50 veces por segundo. Como el proyector de teclado, la luz infrarroja roza la superficie de la mesa. Se espera que el dispositivo de Caneca cueste sólo unas decenas de euros.

—Mike May

ECOLOGIA Y TEORIA DE JUEGOS

El arrendajo azul y el dilema del prisionero

Sólo si uno de los dos individuos coopera se evitará que ambos salgan escaldados, pero si uno coopera y el otro no, éste se lo llevará todo y dejará al primero sin nada. Esta situación, o dilema del prisionero, expresa un obstáculo económico central con el que tropieza el establecimiento de la cooperación. Pero la cooperación existe, y no sólo entre los seres humanos. La repetición de la situación parece explicar cómo se llega a aquélla: cada participante acaba por cooperar si el otro responde a sus acciones en cada repetición con reciprocidad, con un "donde las dan las toman". Sin embargo, los estudios empíricos que intentan generar un dilema del prisionero repetido efectuados con animales arrojan que la cooperación que pueda surgir no es estable. Una de dos: bien los animales aplican un descuento temporal (una preferencia por lo inmediato) más fuerte que los seres humanos, bien no aplican la estrategia de la reciprocidad. Tres ecólogos de la Universidad de Minnesota, Stephens, McLinn y Stevens, han llevado a cabo un experimento con arrendajos azules para calibrar el papel que le toca a cada uno de esos factores. En una pajarera, el salto del arrendajo ante un estímulo luminoso a uno de dos palos equivalía a que cooperase o no. El estímulo luminoso le imponía al otro arrendajo, situado en una pajarera contigua de forma que el primer animal viese qué hacía, una respuesta concreta (recíproca o no, según eligiesen los experimentadores). Por otra parte, al primer arrendajo se le entregaba el pago por sus acciones, bien de inmediato, bien de manera acumulada —el pájaro iba viendo el monto creciente— tras varias repeticiones. La cooperación sólo resultaba estable cuando el descuento era bajo (se acumulaban los premios) y el segundo pájaro respondía con reciprocidad. Si no, la cooperación acababa desbaratándose. No garantiza su estabilidad la mera repetición, ni siquiera con reciprocidad. El problema estriba en descubrir en la naturaleza, donde haya cooperación, qué disminuye el descuento en la medida suficiente.

REGENERACION DE TEJIDOS

No más dentaduras postizas

Un equipo encabezado por la bióloga molecular Pamela C. Yelick, del Instituto Forsyth de Boston, extrajo seis muelas inmaduras a seis lechones de seis meses y las disolvió en enzimas. Dispuso las células procedentes del caldo resultante en un andamiaje de polímero biodegradable y las implantó en los abdómenes de ratas desinmunizadas, cerca de tejidos ricos en sangre. Al cabo de treinta semanas afloraron coronas molares de dos milímetros de ancho, completas, con cámaras de pulpa, raíces y capas óseas de dentina cubiertas de esmalte. Afirman que quizás se puedan cultivar dentro de diez años sustitutos de nuestros dientes perdidos, acaso con formas y tamaños a medida.

—Charles Choi



CANESTA (*arriba*); HANS NELEMAN *Photonica* (*abajo*)





Difundirían polvo radiactivo por las ciudades; cundiría el pánico, aumentaría el número de casos de cáncer y se necesitarían costosas descontaminaciones

Michael A. Levi y Henry C. Kelly

La explosión y la gran llamarada que la sigue son terribles, pero la mayoría de los residentes en el edificio están ausentes, en su trabajo; nadie resulta gravemente herido. Un desfile de coches policiales, ambulancias y camiones de bomberos se sube a los bordillos, acompañado de destellos de luces y resonar de sirenas. Los equipos de emergencia zigzaguean rápidamente entre fragmentos de escombros humeantes y se preparan para entrar en el edificio atacado.

De golpe, destella en el cuadro de sensores de un camión de bomberos una luz de alarma. "¡Los detectores de radiación se han disparado!", exclama el conmocionado jefe de bomberos. "¡Parece una bomba sucia!" La actividad cesa bruscamente y la alarma se extiende entre el personal de los distintos equipos. Lo que parecía un incendio normal es en realidad un ataque terrorista con un arma radiactiva.

Avisadas por radio, las agencias de control de desastres envían al lugar equipos de mitigación de radiaciones. El personal de rescate se pone rápidamente sus trajes protectores de vivos colores. Los agentes de policía, con máscaras antigás, comienzan a evacuar a los espectadores, pero la mayoría de los aterrados mirones ya se aleja corriendo, presas del pánico, con pañuelos sobre la boca.

El ingenio explosivo, con el aditamento de cesio radiactivo, ha liberado una nube de polvo tóxico. Cuando el viento la arrastra, la radiación cae sobre unas sesenta manzanas de la ciudad. Edificios, aceras, calles y vehículos no tardan en cubrirse de residuos radiactivos. Cuando los sistemas de ventilación de los edificios vecinos aspiran ese polvo, las personas inhalan pequeñas cantidades de partículas cancerígenas.

Tras permanecer deshabitadas y en cuarentena durante un corto período, las inmediaciones se convierten en el campo de trabajo de cuadrillas de operarios que descontaminan las superficies con aspiradoras, chorros de agua y otros aparatos; la limpieza se prolongará largo tiempo.

El incidente ha causado pocos daños personales, la mayoría por accidentes de tráfico durante el frenético éxodo. Los residentes, medrosos, se niegan a volver. Los ingresos de los negocios y los valores inmobiliarios se desploman. Hay que demoler algunos edificios cercanos a la zona cero. El costo final se eleva a decenas de miles de millones de euros.

Situaciones así podrían ser una realidad en un futuro no muy lejano. Defendernos de la amenaza de las armas radiactivas se ha convertido en una cruel necesidad. Los componentes y conocimientos necesarios para preparar una bomba sucia están al alcance de cualquiera. El arresto a principios del 2002 del simpatizante de Al Qaeda José Padilla (Abdullah al Muhajir) bajo la sospecha de que tramaba construir y hacer estallar una bomba sucia nos indica el interés en construir esa arma.

Un arma radiactiva, o bomba sucia, no es sino un tosco dispositivo compuesto de explosivos ordinarios, tales como TNT o una mezcla de fuel-oil y fertilizante, a los que se han añadido materiales de intensa radiactividad. Los explosivos generan un golpe de calor que

CATHERINE McINTYRE

1. VIENTO MALIGNO: El mayor peligro de una bomba sucia no es el estallido en sí, sino las partículas radiactivas que proyecta al aire.

vaporiza o convierte en aerosol el material radiactivo y lo dispersa por una zona muy extensa.

Los expertos en armas consideran que las bombas radiactivas, pese a su pobreza técnica, pueden ser efectivas y producir unos daños psicológicos tremendos, habida cuenta del miedo popular a las radiaciones invisibles. Armas de desestructuración masiva, que no de destrucción masiva, esos ingenios causarían grandes estragos económicos al convertir sus objetivos en zonas prohibidas durante largos períodos. Nunca se han usado las bombas radiactivas, sobre todo porque durante mucho tiempo se las ha considerado inapropiadas para fines militares: su efecto se demora demasiado y resultan demasiado impredecibles para decidir una batalla.

Aunque en principio parezca bastante sencillo, construir y desplegar uno de esos ingenios es difícil. No se trata sólo de envolver un cartucho de dinamita con materiales robados. Un arma tan chapucera se limitaría a esparcir grandes trozos de material; se reduciría la zona afectada y facilitaría la descontaminación. Eso sí, una bomba sucia es mucho más fácil de ensamblar que un arma nuclear, aunque se requiere de todas maneras una pericia considerable. Un problema importante es que el constructor podría exponerse fatalmente a isótopos radiactivos. Pero una dosis mortal de radiación quizá tarde semanas en surtir efecto; no disuadiría a unos suicidas.

Hormigón armado radiactivo

En centenares de aplicaciones médicas, industriales y académicas se emplean materiales muy radiactivos. Sólo en EE.UU., hay del orden de dos millones de fuentes de radiación ionizante, miles de las cuales son de buen tamaño. Sus usos comprenden la destrucción de bacterias en los alimentos, la esterilización de productos farmacéuticos, la aniquilación de células cancerosas, la inspección de soldaduras, la prospección petrolífera y la investigación en física e ingeniería nuclear. Durante las décadas de 1960 y 1970, el gobierno federal propició la distribución de isótopos del plutonio para la investigación. Gran parte de ese material sigue allá adonde fue a parar porque el gobierno estadounidense no ha estado dispuesto a pagar su recuperación.

Hay fuentes de radiación ionizante —el cobalto 60, el cesio 137, el iridio 197— que emiten rayos gamma; otras, así el americio 241 y el plutonio 238, producen partículas alfa. Esos materiales suelen ser caros. Las autoridades supusieron siempre que sus propietarios ya se cuidarían, por razones económicas, de no dejarlos al alcance de los ladrones. Los responsables políticos no pensaban que fuese necesaria una mayor vigilancia de esas sustancias; nadie se arriesgaría a exponerse a los niveles de radiación letales que producen.

Pese a esas garantías, en chatarrerías, vehículos y domicilios, tanto en EE.UU. como en Europa, se han hallado abandonadas cantidades de material suficientes para construir bombas sucias. Según un estudio reciente de la Comisión Reguladora Nuclear de EE.UU. (NRC), desde 1996 la industria y las instalaciones de investigación americanas han perdido la pista de casi 1500 aparatos que contenían piezas radiactivas; muchas bastarían para una bomba sucia. La mitad aún no se han recuperado. A principios del año pasado, se encontró en una planta de reciclado de acero, entre la chatarra, una fuente radiactiva. Hace varios años, una cantidad de cesio radiactivo pasó, sin que lo detectaran, por una instalación de recuperación de material; acabó fundida y moldeada como barras de acero para el hormigón armado.

En junio pasado, la Agencia de Energía Atómica declaró que casi todos los países del mundo disponen de los materiales radiactivos necesarios para construir una bomba sucia. Más de cien naciones carecen de los controles suficientes para evitar el robo de esos materiales. Un caso: a fines de 2001, dos leñadores resultaron irradiados en la ex república soviética de Georgia por un generador radiotérmico (una fuente grande de estroncio 90 radiactivo) que hallaron en los bosques y emplearon como calefactor. En 1995 los rebeldes chechenos sembraron el miedo al dejar en un parque de Moscú un recipiente blindado de cesio 137 (sustraído de un equipo de tratamiento del cáncer); informaron del lugar a los periodistas rusos. Ocho años antes, unos chatarreros irrumpieron en una clínica oncológica abandonada de Goiânia (Brasil) y robaron un aparato médico que contenía cesio radiactivo. A esa fuente estuvieron expuestas unas 250 personas, de las que ocho enfermaron y cuatro murieron. El incidente produjo 3500 metros cúbicos de desechos radiactivos —suficientes para cubrir un campo de fútbol hasta la altura de las caderas— y dejó devastada la economía local.

BOMBAS SUCIAS Y BOMBAS NUCLEARES

A veces se confunden las armas radiactivas con las armas nucleares

UNA BOMBA SUCIA es una suerte de dispositivo elemental donde el TNT o el fuel-oil y explosivos de fertilizantes se combinan con materiales muy radiactivos. La bomba, una vez detonada, vaporiza o se convierte en aerosol y lanza al aire los isótopos tóxicos.

Explosivos detonantes
Materiales radiactivos

UNA BOMBA DE FISION es un mecanismo más complejo, que se basa en la creación de una reacción nuclear en cadena desbocada en el uranio 235 o el plutonio 239. Un tipo de bomba de fisión consta de un conjunto de largos conos de plutonio apuntados hacia dentro, rodeados por un caparazón de explosivo detonante. Cuando detonan, los explosivos producen una onda de choque implosiva que dispara los trozos de plutonio sobre una esfera que contiene una pastilla de berilio/polonio en su centro; así se crea la masa crítica. La consiguiente reacción de fisión hace que la bomba estalle con una fuerza tremenda; proyecta al aire ondas electromagnéticas y partículas radiactivas de alta energía.

Explosivos detonantes
Núcleo de berilio/polonio
Componentes de plutonio
Armadura pesada

SARA CHEN

Efectos de la radiación

Además de problemas sanitarios agudos —el mal de radiación—, los materiales radiactivos producen cáncer. Cuantificar los niveles de irradiación peligrosos es difícil; no se conocen con certeza sus efectos concretos sobre la salud.

Los efectos de la radiación suelen medirse en rem. Todos recibimos alrededor de un cuarto de rem al año por exposición a las fuentes naturales, comprendidos los rayos cósmicos y el uranio de los lechos graníticos. En general, las personas sometidas a 100 o más rem desarrollan radiopatías y requieren una atención médica inmediata. La mitad de las personas expuestas a 450 rem muere en un plazo de 60 días. Incluso dosis inferiores aumentan el riesgo de contraer cáncer. Por término medio, si 2500 personas se exponen a sólo un rem, una de ellas morirá de cáncer inducido.

Científicos y legisladores hace tiempo que debaten sobre los niveles de exposición tolerables. Las normas federales prohíben que los trabajadores sometidos a irradiación reciban más de cinco rem al año. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) recomienda abandonar las zonas contaminadas si las medidas descontaminadoras no reducen el riesgo añadido de muerte por cáncer a un caso por cada 10.000 personas, aproximadamente. Ese riesgo añadido equivale a 25 radiografías de tórax en toda la vida o a una exposición a la radiación cósmica en Denver (en el interior, como contraposición a estar en la orilla del mar) durante tres años. Como regla, la NCR fija un umbral menos exigente, equivalente a un incremento del riesgo de muerte por cáncer de uno entre quinientos a lo largo de 50 años. Pero tales estimaciones son discutibles, pues no hay estadísticas aceptables que muestren en qué cuantía aumenta el cáncer como consecuencia de unos niveles de irradiación bajos. Hoy en día, los expertos evalúan los peligros de la exposición suponiendo que la probabilidad de desarrollar un cáncer disminuye en proporción a la radiación recibida. Presuponen también que no hay un nivel mínimo inocuo.

Nube radiactiva en la ciudad

Para entender las repercusiones potenciales de una bomba sucia, examinamos toda una gama de ataques verosímiles. Estudiamos cómo se dispersaría la radiación en diversas situaciones hipotéticas y calculamos la extensión de las zonas cuya contaminación sobrepasaría distintos umbrales de irradiación. Nos servimos del código informático HOTSPOT, desarrollado en el Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, que simula los movimientos de las partículas radiactivas. Los resultados del modelo los combinamos seguidamente con datos experimentales y teóricos sobre los efectos de la radiación para evaluar los riesgos relativos a la salud y la contaminación.

Una dispersión simulada depende de todo un conjunto de variables, entre las que se cuentan la hora del día, el tiempo atmosférico, la velocidad del viento y los métodos de dispersión. Así, unos vientos intensos esparcen los materiales sobre zonas más extensas y reducen la contaminación en cada punto concreto. Para asegurarnos de que nuestras conclusiones no eran sólo el resultado de unas condiciones iniciales específicas, ejecutamos el programa para más de 100 situaciones

EFECTOS DE LA RADIACION SOBRE EL CUERPO HUMANO

LOS RAYOS ALFA generan mutaciones genéticas; las células se dividen rápidamente y convierten en cancerosas. Las partículas suspendidas en el aire que emiten rayos alfa se alojan en los pulmones, donde dañan los tejidos internos y causan tumores.

Los rayos gamma, que penetran en el cuerpo, también producen mutaciones genéticas y cáncer.

La precipitación de partículas de polvo emisoras de rayos alfa puede llegar, por inhalación, a los pulmones

Los rayos alfa pueden causar mutaciones genéticas que desemboquen en cáncer

Los rayos gamma pueden producir mutaciones carcinógenas

La piel y la ropa bloquean los rayos alfa

RAYOS ALFA

Los residuos radiactivos caídos sobre el suelo pueden emitir rayos gamma que penetren en el organismo

RAYOS GAMMA

SARA CHEN

Los autores

MICHAEL A. LEVI y HENRY C. KELLY, físicos, trabajan para la Federación de Científicos Americanos (FCA), una organización para la investigación y defensa legal con sede en Washington que se interesa por la ciencia y la política pública. Levi dirige el Proyecto de Seguridad Estratégica de la FCA y sus investigaciones se centran en la no proliferación nuclear y en la política de armas nucleares. Kelly es presidente de la FCA. Antes de ingresar en ésta, fue director ayudante para la tecnología en la Oficina de Ciencia y Técnica de la Casa Blanca entre 1993 y 2000. Los autores expresan su agradecimiento a Jaime Yassif, de la FCA, por haberles ayudado en la investigación.



2. UN PENACHO MALSANO de desechos radiactivos se extiende sobre la isla de Manhattan tras la detonación simulada de una bomba sucia de cesio radiactivo (se supone que sopla viento del sudoeste). En las zonas resaltadas cabría esperar unos niveles de irradiación comparables a los que causaron el aislamiento de las regiones contaminadas en torno a la central nuclear de Chernobil.

de dispersión diferentes. Dada una fuente radiactiva concreta, las variaciones en las condiciones ambientales alteraron nuestras estimaciones como mucho en un factor de 10. Ese intervalo de error no afecta a las conclusiones básicas, aunque sólo sea porque los distintos factores tienden a compensarse unos a otros. Por cada factor que podría reducir a la mitad las consecuencias de una bomba, hay otro que las duplicaría.

Si las personas próximas a una explosión no abandonan la zona antes de que llegue la nube, inhalarán pequeñas partículas. Por incidentes pasados, sabemos que si el material es un emisor alfa, americio o plutonio por ejemplo, se alojará en los pulmones de las víctimas durante años e inducirá una irradiación a largo plazo. Pero si a los evacuados se los descontamina sin perder tiempo, con una limpieza concienzuda de la piel y deshaciéndose de las ropas contaminadas, la exposición total será mínima.

El polvo producido por un arma radiactiva permanecería atrapado durante largos períodos en las grietas y resquicios de los edificios, aceras y calles; parte sería arrastrado a los interiores. Ciertos materiales que podrían emplearse en un ataque radiactivo, como el cesio 137, se unen químicamente al vidrio, hormigón y asfalto. Más de 15 años después de la catástrofe de la central nuclear de Chernobil, sucedida en 1986, el cesio sigue adherido a las aceras de numerosas ciudades escandinavas, adonde lo llevó el viento. Por suerte, la exposición a las radiaciones que manan del suelo es bastante baja; aumentan el riesgo de cáncer en menos de un caso por cada 10.000 personas.

Si el material contiene emisores alfa, los riesgos para la salud a largo plazo proceden de respirar el polvo radiactivo suspendido en el aire por el viento, por los neumáticos, por los peatones. En Kiev, a más de 100 kilómetros de Chernobil, el polvo de las calles aún contiene bajos niveles de plutonio. Si el material que quedase en la zona contuviera cesio 137 u otros emisores gamma, todos los que entrasen en ella se expondrían a una radiación de baja energía que, a diferencia de los rayos alfa, traspasa la ropa y la piel.

Consideremos la dispersión de 3500 curios de cesio 137 a causa de una explosión en la punta sur de la isla de Manhattan. Fuentes capaces de liberar tal radiación han quedado "huérfanas" en la ex Unión Soviética; recientemente, EE.UU. ha destinado 25 millones de dólares para seguir, junto con Rusia, la pista a esos materiales. A unos terroristas que se hubiesen hecho con una fuente de ese tipo les sería difícil manejarla; se necesitaría cierto blindaje para que el constructor de la bomba no recibiese una irradiación que lo dejara incapacitado. Pero el cesio ya estaría en forma pulverulenta; no sería muy difícil dispersarlo.

Si se hiciera estallar una fuente así, resultarían contaminados, con un nivel superior a lo marcado por la EPA, unos 800 kilómetros cuadrados. El desastre no tendría la magnitud del de Chernobil; en total liberaría menos radiación, y ninguna en la forma de isótopos potentes de corta duración, como el yodo 131. Pero por lo estratégico del blanco, los estragos serían considerables. En un área de unas 20 manzanas, el riesgo de morir de cáncer aumentaría entre los residentes (si no se descontaminase esa zona) en un caso por cada diez en 30 años, un aumento del 50 por ciento sobre la tasa de fondo. La contaminación de una zona más extensa, de 15 kilómetros cuadrados —entre 4 y 20 kilómetros cuadrados, según las condiciones atmosféricas— sobrepasaría el umbral de reubicación recomendado por la Comisión Internacional de Protección

SARA CHEN (*arriba*); YUN JAI-HYOUNG *AP Photo* (*abajo*)



3. UNA LIMPIEZA COSTOSA sigue a la explosión de una bomba sucia. Operarios con trajes protectores friegan las superficies con chorros de agua o arena y aspiradoras para eliminar los residuos dañinos, además de retirar las plantas y la tierra contaminadas.

Radiológica, aceptado por la NRC. Si esas normas se relajaran y el umbral de reubicación fuese el mismo que se aplicó en torno a Chernobil, la parte afectada aún sería del orden de 100 manzanas. Se calcula que su valor inmobiliario llega a los centenares de miles de millones de dólares.

Métodos de descontaminación

Nunca se ha eliminado contaminación urbana radiactiva a gran escala porque hasta ahora nadie ha tenido que ocuparse de las consecuencias de un ataque radiactivo. Nuestros conocimientos actuales de cómo depurar una zona urbana se basan en la experiencia adquirida con operaciones industriales a escala más reducida y en los estudios de la época de la guerra fría acerca de las secuelas de una guerra nuclear.

Para empezar, la limpieza habría de eliminar la contaminación libre, o sea, las partículas de polvo radiactivo depositadas en las superficies o alojadas en los intersticios. Para ello bastaría con unas técnicas mecánicas no demasiado costosas, como la aspiración o el lavado a presión. En materiales más porosos donde el polvo nocivo hubiera penetrado hondo se necesitarían procedimientos de eliminación superficial más invasivos y caros, como atacar el material con chorros de arena. En algunos casos, habría que levantar aceras y asfaltado. Tal vez no quedaría más remedio que acarrear la capa superior del suelo lejos del lugar, para deshacerse de ella adecuadamente. Quizá habría que podar la vegetación. Para disolver la herrumbre y los depósitos minerales donde hubiesen quedado atrapados contaminantes tendrían que emplearse agentes químicos, ácidos.

Para que el proceso no se desboque, puede que haya que reconsiderar las directrices sobre contaminación. Las estrictas normas de la EPA son adecuadas en tiempos de paz; se redactaron (tras una consulta pública) con la intención de imponer límites a las industrias contaminadoras. Ante la posibilidad de tener que abandonar distritos de una ciudad, quizá deberíamos aceptar un mayor peligro. Cabría adoptar las directrices de la NRC, que obligan a limpiar toda zona donde la contaminación produzca una irradiación mayor que cinco rem a lo largo de 50 años, lo que aumenta el riesgo de muerte por cáncer en un caso por 500 personas (equivalente a reducir en unos 15 días la esperanza de vida de cada persona). O bien, cabría exigir la limpieza de todas las zonas donde la contaminación multiplique por más de dos la tasa de radiación de fondo.

Medidas protectoras

Para reducir los riesgos de las armas radiactivas y minimizar los efectos si tuviera lugar un ataque, pueden tomarse numerosas medidas prácticas cuyo costo no sería demasiado grande. La primera es asegurarse de que los materiales mismos son seguros. La NCR y otras agencias federales están endureciendo tanto la concesión de licencias para acceder a los materiales radiactivos como las pautas de seguridad de cualquier producto peligroso. Las inspecciones deben ser frecuentes y concienzudas. Es necesario ampliar los programas de recogida y salvaguarda de los materiales no usados, llevar más allá iniciativas como el exitoso Proyecto de Recuperación de Fuentes Externas de Los Alamos.

Debe, además, financiarse la investigación encaminada a encontrar técnicas menos peligrosas (los haces iónicos, por ejemplo) que proporcionen la esterilización alimentaria y los servicios médicos y de otra especie que ahora brindan los materiales radiactivos. Si aumentan las exigencias de seguridad, se encarecerá el uso de los materiales radiactivos y habrá incentivos económicos para adoptar las alternativas no radiactivas.

La medida siguiente sería mejorar nuestra capacidad de dar con materiales robados. Convendría que EE.UU. instalase un extenso dispositivo de sistemas de detección de radiaciones en puntos clave: aeropuertos, puertos, estaciones de ferrocarril, túneles, autopistas, fronteras. Ya se está en ello: en el corredor Boston-Nueva York-Washington y en el perímetro de la capital se están instalando detectores de radiación de los Equipos de Investigación de Emergencias Nucleares, del Departamento de Energía. Unas comprobaciones rutinarias en las chatarrerías y en los vertederos protegería también ante un vertido ilegal o accidental de materiales peligrosos. En aplicaciones como éstas, son innecesarios los detectores de alta sensibilidad; podrían comprobarse todos los materiales a la entrada de cada instalación (no parece probable que fuera a haberlos blindados). Bastaría con unos contadores Geiger sencillos y baratos.

Debemos, asimismo, asegurarnos de que el gobierno esté preparado para mitigar las repercusiones de cualquier arma radiactiva que se llegara a utilizar. Una reacción eficaz ante un ataque requiere un sistema que

Qué hacer en caso de ataque

En caso de que se produzca un incidente con armas radiactivas, tómense las siguientes medidas básicas:

Si se encuentra usted en un interior, cierre las ventanas y apague toda ventilación procedente del exterior. Así evitará la entrada de partículas radiactivas. Aunque las máscaras filtrantes son útiles en el exterior, dentro de las casas no ofrecen una protección extra.

Si se encuentra usted al aire libre, métase en un interior, lávese y deshágase de la ropa. Así eliminará las partículas radiactivas. Puede que arrastre consigo una pequeña cantidad de residuos radiactivos, pero compensa ese peligro el beneficio de estar a cubierto. Permanezca así hasta que las autoridades o el personal de los servicios de emergencia informen de otra cosa. Si la gente empieza a huir del lugar afectado, será más difícil contener la contaminación y desplazar eficazmente el personal y los equipos de emergencia.

Las tabletas de yodo no sirven de nada: no es probable que las bombas sucias (a diferencia de cuando se funde un reactor nuclear) liberen yodo radiactivo.

calibre rápidamente la extensión de los daños, ponga en marcha las respuestas adecuadas, desarrolle un plan de reacción coherente y traslade velozmente al lugar el personal y los equipos necesarios. Para aliviar los temores, las autoridades federales deberían designar un único funcionario, científicamente creíble, que informara con coherencia acerca del ataque.

Todo esto requiere un entrenamiento intenso. El personal de emergencias y hospitales necesita saber cómo debe proteger a los ciudadanos afectados y protegerse a sí mismo durante un ataque nuclear; también ha de ser capaz de determinar sin dilación si un individuo ha estado expuesto a la radiación. Aunque se han dedicado fondos generosos para la instrucción, se necesita una concepción clara de cómo va a gestionarse.

Finalmente, hemos de aprender a descontaminar zonas urbanas extensas y a determinar las medidas necesarias para minimizar la contaminación. Podría suponer la diferencia entre abandonar o demoler una ciudad, o recuperarla tras unos meses de limpieza.

Aunque los efectos de un ataque radiactivo son leves comparados incluso con los de un arma nuclear pequeña, una bomba sucia podría tener unas consecuencias económicas y psicológicas implacables. Por suerte, el estudio de la naturaleza de los peligros que comportaría nos da la oportunidad de tomar medidas que reduzcan la probabilidad de que estalle una de esas bombas o minimicen los daños si llega a ocurrir. Hay que empezar ahora mismo.

Bibliografía complementaria

MAKING THE NATION SAFER: THE ROLE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY IN COUNTERING TERRORISM. Comité de Ciencia y Tecnología, Consejo Nacional de Investigación, 2002.

SECURING NUCLEAR WEAPONS AND MATERIALS: SEVEN STEPS FOR IMMEDIATE ACTION. M. Bunn, J. Holdren y A. Weir. Harvard University Press, 2002.

Colisiones estelares

El choque de dos estrellas debe de ser un espectáculo maravilloso. Creíase que se trataba de un fenómeno imposible, hasta que la inquisición en ciertas aglomeraciones de la galaxia ha revelado su cadencia normal

Michael Shara

No habría manera de extinguir la vida sobre la Tierra más impresionante que el choque del Sol con otra estrella. Si el proyectil fuera una enana blanca —una estrella muy densa que almacenase la masa del Sol en un cuerpo cien veces menor—, quienes habitasen la Tierra presenciarían unos fuegos artificiales formidables. La enana blanca penetraría en el Sol a velocidades hipersónicas, de más de 600 kilómetros por segundo; se crearía una onda de choque inmensa que comprimiría y calentaría el Sol hasta temperaturas superiores a las de la ignición termonuclear.

Tardaría una hora la enana blanca en atravesar el Sol. El daño sería irreversible. El Sol, sobrecalentado, produciría, en ese breve intervalo temporal, la energía de fusión que genera en cien millones de años. El aumento de la presión expulsaría gas a velocidades muy superiores a la de escape. En unas pocas horas, el Sol se dispersaría por sí mismo. Mientras tanto, la causante de tamaña catástrofe, la enana blanca, continuaría su viaje impávida.

A ningún astrónomo de la primera mitad del siglo XX le hubiera parecido pertinente ocuparse de las colisiones entre estrellas. En los alrededores del Sol, las distancias interestelares adquieren tal magnitud, que no cabe imaginar el encuentro violento de una estrella con otra. Al Sol (y a la Tierra) podrá ocurrirle otro tipo de calamidades en el futuro lejano, pero no entra dentro de lo plausible una colisión con una estrella cercana. Según unos cálculos simples realizados a principios del siglo XX por James Jeans, astrofísico británico, ni una sola estrella de los cien mil millones que pueblan el disco de nuestra galaxia ha chocado alguna vez con otra.

No significa ello que las colisiones sean escasas. Las suposiciones y conclusiones de Jeans valen para el entorno del Sol, no para otras regiones más exóticas de la Vía Láctea. Los cúmulos densos de estrellas constituyen verdaderas pistas de choque. En esas apretadas piñas estelares, se han descubierto, en los últimos años, cuerpos que los principios de la evolución estelar ordinaria prohíben; se atribuye su existencia al choque entre estrellas. Las colisiones pueden alterar la evolución a largo plazo de cúmulos enteros. Las más violentas se observan a mitad del camino hacia los confines visibles del universo.

1. SI UNA ENANA BLANCA se lanzara contra el Sol, se desencadenaría una serie de calamidades desastrosas —a pesar de que la envergadura de la enana blanca es sólo una centésima del diámetro solar—. A medida que la enana se aproximara, succionaría materia del Sol y lo deformaría; le daría forma de pera. Por suerte, una colisión tal es muy improbable. Pero fenómenos similares ocurren con regularidad en las regiones más densas de la galaxia; por ejemplo, en los cúmulos globulares de estrellas.

MARK A. GARLICK

Un mundo de estrellas voraces

El descubrimiento en 1963 de los cuásares hizo que los astrónomos escépticos tomaran en serio las colisiones estelares. Muchos cuásares radian la energía de cien billones de estrellas juntas. Algunos resplandecen con intensidad y apagan su brillo en menos de un día. Quiere eso decir que las regiones productoras de energía no son mayores que la distancia que la luz puede viajar en 24 horas; con otras palabras, su tamaño no supera el de nuestro sistema solar. Ahora bien, ¿si hubiera apiñadas millones de estrellas en un volumen tan pequeño, chocarían unas con otras? ¿Podrían esas colisiones liberar energías tan ingentes?

Hacia 1970 quedó clara para los astrónomos una respuesta negativa a la segunda pregunta. Tampoco podía el violento baile estelar explicar los estrechos chorros de luz que emanan de los generadores centrales de energía de muchos cuásares. La responsabilidad recayó en agujeros negros de masa elevadísima. (No obstante, por ese vaivén característico de la historia de la ciencia, acaba de proponerse que las colisiones de estrellas quizá proporcionen material a estos agujeros.)

Si los astrónomos extragalácticos abandonaron la teoría de las colisiones estelares, los dedicados al estudio de galaxias llevaron dicha tesis a sus últimas consecuencias. El satélite Uhuru, lanzado en 1970 para explorar el cielo en busca de objetos emisores de rayos X, descubrió unas cien fuentes brillantes en la Vía Láctea. Un diez por ciento pertenecen al tipo más denso de cúmulo estelar, los cúmulos globulares. Sin embargo, éstos sólo incluyen un 0,01 por ciento de las estrellas de la Vía Láctea. Por alguna razón, albergan un número desmesurado de fuentes de rayos X.

Planteemos de otra forma el problema. Atendamos al origen de esas fuentes de rayos X. Se cree que cada una está formada por una pareja de estrellas. De éstas, una ha dejado de existir, contraída y convertida en una estrella de neutrones o un agujero negro. La exestrella engulle a su compañera. Mientras realiza ese proceso de canibalismo calienta el gas circundante hasta temperaturas elevadísimas; en esas condiciones el gas emite rayos X. No abundan, sin embargo, estas parejas violentas. La evolución simultánea de dos estrellas recién nacidas, ligadas en un sistema binario, acaba en la formación de una binaria luminosa de rayos X con una cadencia insignificante: una vez en mil millones.

¿Qué ocurre en los cúmulos globulares para que rompan esta estadística? A la hora de acotar el factor decisivo, los astrónomos pensaron en la superpoblación. Un millón de estrellas se congregan en un volumen cuyo diámetro se limita a unas pocas docenas de años luz; trasladado a las cercanías del Sol, ese volumen sólo acomodaría unas cien estrellas. A la manera de un enjambre de abejas, las estrellas del cúmulo describen órbitas siempre cambiantes. Las de masa menor tienden a ser expulsadas del cúmulo conforme van ganando energía en sus estrechas aproximaciones a estrellas dotadas de mayor masa, individuales o dobles. Un proceso que recibe el nombre de evaporación, en virtud de su semejanza con la fuga molecular de la superficie de un líquido. Las estrellas que permanecen en el cúmulo, al haber perdido energía, se concentran aún más en torno al núcleo del mismo. Transcurrido tiempo suficiente, esas estrellas tan justas empezarán a chocar entre sí.

Incluso en un cúmulo globular la distancia media entre estrellas es mucho mayor que la extensión de éstas. Pero Jack G. Hills y Carol A. Day, entonces en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, demostraron en 1975 que la probabilidad de impacto no es sólo función del diámetro de la estrella. Puesto que las estrellas de un cúmulo globular se mueven a la morosa velocidad (según los estándares cósmicos) de 10 a 20 kilómetros por segundo, la gravedad dispondrá de tiempo para actuar cuando se acerquen. Sin la gravedad, dos estrellas chocarán sólo si se enfrentan directamente una contra otra; con gravedad, una estrella tira de la otra y la desvía de su camino. Las estrellas dejan de ser misiles balísticos, con el vuelo preprogramado, y se convierten en cohetes guiados que persiguen su objetivo. La probabilidad de una colisión se multiplica por 10.000. Entra dentro de la razonable suponer que la mitad de las estrellas de las regiones centrales de un cúmulo globular hayan sufrido una o más colisiones en los últimos 13.000 millones de años.

Por las mismas fechas, Andrew C. Fabian, James E. Pringle y Martin J. Rees, de la Universidad de Cambridge, indicaron que las colisiones rasantes o una aproximación muy ceñida pueden emparejar dos estrellas solitarias. El encuentro cercano de dos cuerpos celestes suele ser simétrico: se aproximan, ganan velocidad, describe cada uno un camino curvo alrededor del otro y, a menos que haya contacto, se alejan. Pero si uno de estos cuerpos es una estrella de neutrones o un agujero negro, su intenso campo gravitatorio distorsionará el otro objeto celeste, se llevará parte de su energía cinética e impedirá que escape, en un proceso conocido como captura de marea. La estrella de neutrones o el agujero negro devorará a la presa que ha atrapado y emitirá rayos X.

Si el encuentro cercano involucra no sólo a dos, sino a tres estrellas, aumenta la probabilidad de que se forme una binaria de rayos X. La dinámica de tres cuerpos es bastante compleja y, en algunas ocasiones, caótica; las estrellas suelen redistribuir su energía de tal forma, que las dos de mayor masa se emparejan y

Resumen/*Las colisiones estelares*

- Nos hallamos ante uno de esos casos en que los libros de texto han de revisarse. La creencia común, que las estrellas nunca chocan, es errónea. Hay colisiones en los cúmulos de estrellas, especialmente en los globulares, donde la densidad estelar es muy alta y las interacciones gravitatorias aumentan la probabilidad de impacto.
- Dos tipos de observaciones apoyan la teoría de las colisiones. Los cúmulos globulares contienen ciertas estrellas, las “azules rezagadas”, que se explican como el resultado de los choques. Y los cúmulos globulares contienen una cantidad fuera de lo normal de fuentes de rayos X, producto probable, también, de las colisiones.

la tercera sale despedida. En la situación típica, una estrella de neutrones solitaria se aproxima demasiado a una binaria común. Se expulsa uno de estos dos astros corrientes y la estrella de neutrones ocupa su lugar; nace una fuente de rayos X. La dinámica de tres cuerpos y la captura de marea multiplican por mil el ritmo de creación de fuentes de rayos X en los cúmulos globulares. Así queda resuelto el problema de Uhuru.

La escena del choque

¿Qué ocurre cuando dos estrellas chocan? Como en la colisión de dos vehículos, los resultados dependen de varios factores: la velocidad de los objetos, sus estructuras internas y el parámetro de impacto (que especifica si el choque es frontal o de lado). Hay golpes que apenas abollan los parachoques, algunos terminan en siniestro total y otros caen entre los dos extremos. Los choques a alta velocidad frontales convierten mejor la energía cinética en calor y aumento de presión; causan siniestros totales.

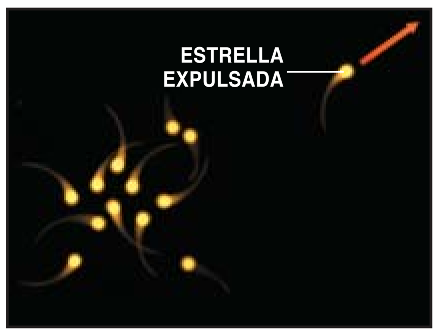
Aunque los astrónomos confían en las supercomputadoras para estudiar las colisiones en detalle, sólo unos pocos principios gobiernan el efecto global. El más importante es el contraste de densidad. Una estrella densa sufrirá menos que otra más enrarecida; por expresarlo de un modo gráfico: a un proyectil apenas le quedan marcas cuando revienta una sandía. Mis compañeros Giora Shaviv y Oded Regev, entonces en la Universidad de Tel Aviv y ahora en el Instituto Technion en Haifa, y yo estudiamos la colisión frontal de una estrella de tipo solar y un astro mucho más denso, una enana blanca, en los decenios de 1970 y 1980. La estrella solar quedaba aniquilada; la enana blanca, diez millones de veces más densa, sólo sufría el calentamiento suave de sus capas exteriores. Salvo por una abundancia mayor de lo normal de nitrógeno en su superficie, nada cambiaba en ella.

Más huellas le quedan a la enana blanca de una colisión rasante, según el modelo que preparamos Regev, Noam Soker, de la Universidad de Haifa en Oranin y la Universidad de Virginia, Mario Livio, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y yo

LOS PROCESOS QUE HACEN MAS PROBABLES LAS COLISIONES

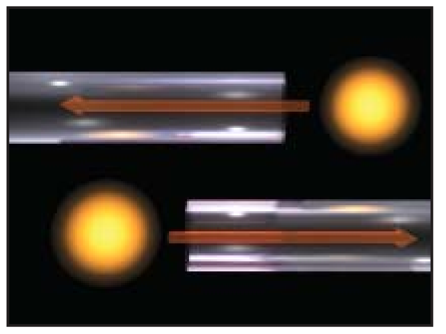
EVAPORACION
LAS ESTRELLAS de un cúmulo globular se mueven en su entorno a la manera de abejas en un enjambre. En ocasiones, tres o cuatro se acercan demasiado. Su encuentro redistribuye la energía y una sale lanzada fuera del cúmulo. El resto de los miembros del cúmulo se agrupa aún más. Si se expulsa un número considerable de estrellas, las restantes comienzan a chocar. Este proceso abarca miles de millones de años.

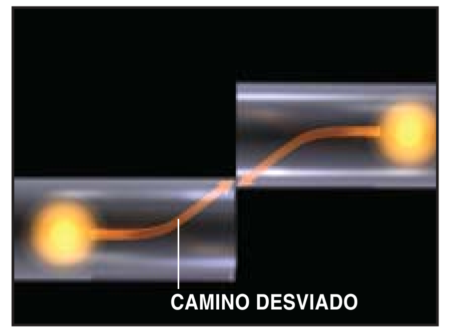




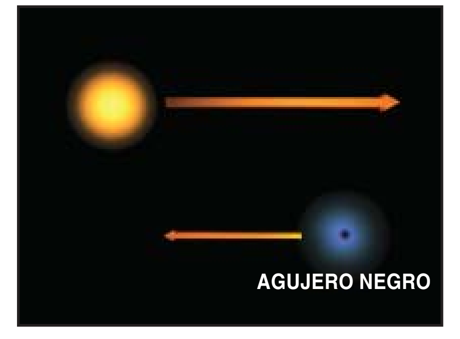


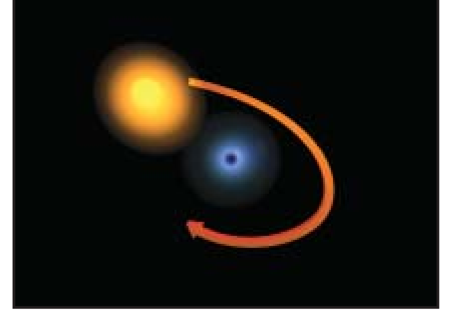
ENFOQUE GRAVITATORIO
LAS ESTRELLAS resultan, a escala cósmica, blancos pequeños. Cada estrella barre una región angosta del espacio; a primera vista, parece muy improbable que dos puedan colisionar. Pero la gravedad amplía el blanco al desviar los caminos de los objetos que se aproximan entre sí. De esa forma cada estrella barre una región muchas veces mayor que su propio tamaño, con lo que aumenta la probabilidad de solapamiento y colisión.





CAPTURA DE MAREA
UN AGUJERO NEGRO o una estrella de neutrones son dianas aún más reducidas que una estrella normal. Pero ejercen grandes fuerzas de marea que deforman la estructura de las estrellas que pasen a su alrededor. La distorsión disipa energía y hace que los dos cuerpos entren en órbita, el uno en torno al otro. La colisión es ya una cuestión de tiempo, puesto que en cada acercamiento se va perdiendo energía orbital.





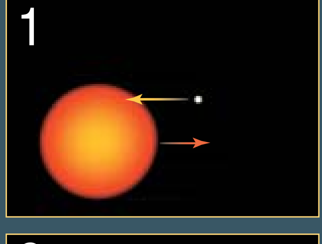
ALFRED T. KAMAJIAN

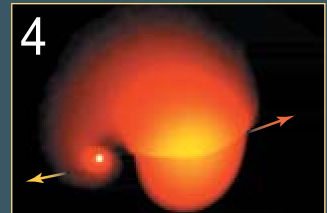
COLISIONES ESTELARES

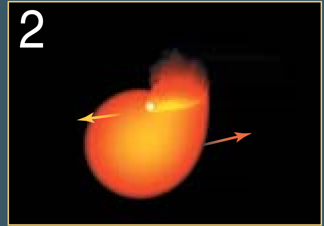
	SUPERGIGANTE	GIGANTE ROJA	SECUENCIA PRINCIPAL	ENANA MARRON	ENANA BLANCA	ESTRELLA DE NEUTRONES	AGUJERO NEGRO
AGUJERO NEGRO	agujero negro + disco + enana blanca	agujero negro + disco + enana blanca	agujero negro + disco	agujero negro + disco	agujero negro + disco	agujero negro + disco	agujero negro
ESTRELLA DE NEUTRONES	estrella de neutrones o agujero negro + disco + enana blanca	estrella de neutrones o agujero negro + disco + enana blanca	estrella de neutrones o agujero negro + disco	estrella de neutrones o agujero negro + disco	estrella de neutrones o agujero negro + disco	estrella de neutrones o agujero negro + disco	
ENANA BLANCA	enana blanca + enana blanca	enana blanca + enana blanca	enana blanca	enana blanca o estrella de neutrones	estrella de neutrones o enana blanca		
ENANA MARRON	enana marrón + enana blanca	enana marrón + enana blanca	secuencia principal	secuencia principal o enana marrón			
SECUENCIA PRINCIPAL	secuencia principal + enana blanca	secuencia principal + enana blanca	secuencia principal				
GIGANTE ROJA	enana blanca + enana blanca	enana blanca + enana blanca					
SUPER-GIGANTE	enana blanca + enana blanca						

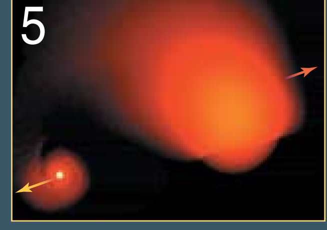
LAS ESTRELLAS se agrupan en siete tipos básicos. Los agujeros negros son los objetos más densos; las supergigantes, las más ligeras. Nuestro Sol es una estrella de la secuencia principal. Esta tabla presenta los resultados de las 28 posibles parejas. En muchos casos, una colisión puede resultar en uno o más productos, dependiendo de la velocidad de impacto, del ángulo y de otros parámetros. Los resultados de la tabla presuponen que en las colisiones los astros se interpenetran profundamente a velocidades moderadas. A continuación se muestran dos de esos choques.

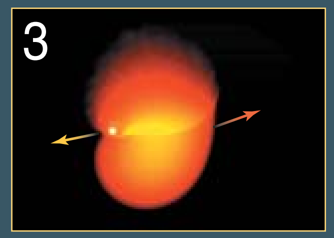
UNA ENANA BLANCA GOLPEA A UNA GIGANTE ROJA





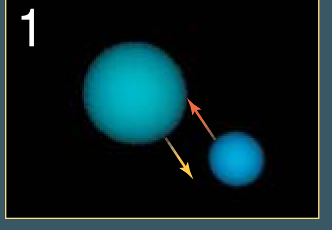


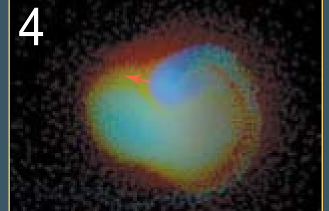


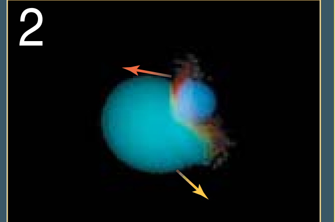


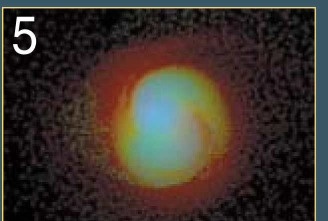
LA ENANA BLANCA necesita un mes para atravesar la dilatada gigante roja. Escapa sin sufrir alteraciones y atrapa parte del gas de la gigante. La estrella gigante, sin embargo, se rompe, aunque su núcleo permanece intacto. Se convierte en una enana blanca.

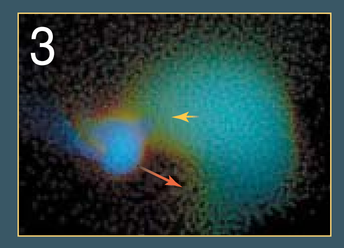
UNA ESTRELLA DE LA SECUENCIA PRINCIPAL GOLPEA A OTRA











DOS ESTRELLAS COMUNES de masa diferente han chocado de lado. La más pequeña tiene menos masa pero es más densa, por lo que permanece inalterada durante más tiempo. En el transcurso de una hora, ha excavado un agujero en la estrella mayor. El resultado es una única estrella que gira muy rápido. Parte de la masa se pierde en el espacio.

MATTHEW BATE *Universidad de Exeter (abajo, izquierda)*; JOSHUA BARNES *Universidad de Hawai (abajo, derecha)*

El autor

MICHAEL SHARA dirige el departamento de astrofísica del Museo Americano de Historia Natural en la ciudad de Nueva York. Antes de pertenecer al Museo, trabajó durante 17 años en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, donde supervisó los comités de revisión del Telescopio Espacial Hubble. Los intereses científicos de Shara incluyen las colisiones de estrellas, novas y supernovas, y las poblaciones de estrellas que habitan los cúmulos globulares y las galaxias.

mismo. La estrella solar desintegrada podría formar un disco de gran masa, en órbita alrededor de la enana. Aún no se ha observado que tales discos existan, pero los astrónomos quizá los estén confundiendo con estrellas binarias que se transfieren masa dentro de los cúmulos estelares.

Cuando las estrellas que chocan son del mismo tipo, densidad y tamaño, difiere bastante la secuencia de los acontecimientos. Estudió el caso de dos estrellas de tipo solar, a principios de los años setenta, Alastair G. W. Cameron (entonces en la Universidad de Yeshiva y ahora en la Universidad de Arizona) y Frederick G. P. Seidl, del Instituto Goddard de Estudios espaciales de la NASA. A medida que las estrellas, al principio esféricas, se van solapando, se comprimen y distorsionan mutuamente; adoptan formas de media luna. Las temperaturas y las densidades nunca alcanzan la cuantía necesaria para provocar una combustión termonuclear destructiva. Un tanto por ciento pequeño de la masa total se desprende en una dirección perpendicular al movimiento estelar; el resto se mezcla. En una hora, las dos estrellas se han fundido en una sola.

Resulta mucho más probable que dos estrellas no choquen de frente y de lleno. Lo es también que tengan masas diferentes. De este caso general se han ocupado los grupos de Willy Benz, de la Universidad de Berna, Frederic A. Rasio, de la Universidad del Noroeste, James C. Lombardi, de la Universidad Vassar. Se trata, resumido en lenguaje metafórico, de una suerte de baile de cortejo, que termina con la unión perpetua de las dos estrellas.

El objeto resultante difiere mucho de una estrella solitaria y parecida al Sol. Una estrella solitaria carece de la posibilidad de reponer combustible; su tiempo de vida está fijado. Cuanto mayor sea su masa, más caliente será y más deprisa se consumirá a sí misma. Dado el color de una estrella, indicador de su temperatura, los modelos de producción de energía predicen con gran precisión cuánto vivirá. Pero una estrella nacida de la unión de otras dos no sigue las mismas reglas. Al mezclar las capas de gas durante el choque, se añade hidrógeno fresco al núcleo. El nuevo objeto, al contar con una masa mayor que sus progenitores, será más caliente, azul y luminoso. Quienes observen esa estrella y utilicen su color y luminosidad para deducir su edad, se equivocarán.

La vida entera del Sol abarcará diez mil millones de años. Una estrella que posea el doble de masa brillará diez veces más y vivirá sólo 800 millones de años. Por tanto, si dos estrellas de tipo solar se funden en una hacia la mitad de sus vidas, formarán una estrella caliente aislada que ya tendrá cinco mil millones de años en el momento de su creación, pero parecerá más joven, como si sólo hubiera existido 800 millones de años. La vida que le quede dependerá de la cantidad de hidrógeno que se suministró al núcleo durante la colisión. Por lo general, vivirá bastante menos que las estrellas progenitoras. Tras pasar por las etapas de gigante roja, nebulosa planetaria y finalmente enana blanca, será mucho más caliente que otras enanas blancas de mayor edad y masa similar.

Estrellas azules

En un cúmulo globular se distinguen bien las estrellas de gran masa engendradas por la unión de otras dos. Todos los miembros del cúmulo nacieron más o menos al mismo tiempo; su temperatura y brillo evolucionan a la par [*véase* "La edad de las estrellas", por Brian C. Chaboyer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2001]. Pero una estrella creada por la unión de dos pierde sincronía con las demás. Aparenta una juventud extraordinaria; sobrevive cuando otras estrellas de brillo y colores similares ya han desaparecido. La presencia de estas estrellas en los núcleos de los cúmulos estelares más densos es una de las predicciones más directas de la teoría de las colisiones estelares.

Allan R. Sandage, del Instituto Carnegie de Washington, descubrió a principios del decenio de 1950 que los cúmulos globulares contienen estrellas de una temperatura y brillo insólitos, las "azules rezagadas". Con los años, se ha desarrollado una docena o más de teorías para explicar su origen. Hubo que esperar, sin embargo, al telescopio espacial Hubble para obtener pruebas muy claras que relacionan estas estrellas con las colisiones.

En 1991, Franceso Paresce, George Meylan y yo, entonces en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, encontramos que el núcleo del cúmulo globular 47 Tucanae se halla repleto de azules rezagadas, en la cuantía predicha por la teoría de las colisiones. Seis años más tarde, David Zurek, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, Rex A. Saffer, de la Universidad de Villanova, y yo logramos la primera medida directa de la masa de una azul rezagada en un cúmulo globular. Más o menos dobla la masa de la mayoría de las estrellas comunes del cúmulo —tal y como cabe esperar si nació de la unión de dos estrellas—. Saffer y sus colaboradores encontraron, además, otra azul rezagada que triplica la masa de cualquier estrella común de su cúmulo. No se conoce ninguna forma, como no sea la unión de estrellas, de crear objetos tan pesados en un cúmulo de estrellas.

Estamos midiendo la masa y la rotación de una docena de azules rezagadas. Mientras tanto, los observadores también buscan otros efectos predichos por la teoría de colisiones. Así, el grupo de S. George Djorgovski, del Instituto de Tecnología de California, ha reseñado una carencia notable de estrellas gigantes rojas cerca de los núcleos de los cúmulos globulares.



2. **TRAS SU CHOQUE** con una enana blanca, el Sol estallaría como una inmensa bomba termonuclear. Dejaría tras de sí una nebulosa gaseosa. Un tanto por ciento pequeño de la masa del Sol se acumularía en un disco que rodearía a la enana blanca, que seguiría su camino. La Tierra sobreviviría, pero los océanos y la atmósfera se evaporarían. Puesto que ya no habría el campo gravitatorio de una estrella central, los planetas se perderían en el espacio interestelar y vagarían sin vida por la galaxia.

Las gigantes rojas tienen diámetro miles de veces mayores que el solar; constituyen dianas de gran tamaño. Su escasez se explica de forma natural por los choques que les arrancarían las capas exteriores y las transformarían las estrellas de otro tipo.

Todas estas pruebas son circunstanciales. La definitiva, quizá no la consigamos. El tiempo promedio entre colisiones dentro de los 150 cúmulos globulares de la Vía Láctea se cifra en unos 10.000 años; en miles de millones de años, por lo que concierne al resto de la galaxia. La suerte vendría a nuestro paso sólo si se hubiera producido una colisión cercana a nosotros en unos cuantos millones de años luz, capaz de ser captada por nuestros medios técnicos. Quizás ofrezcan la primera detección en tiempo real de un choque los observatorios de ondas gravitatorias que ahora empiezan a funcionar. Los acercamientos de cuerpos de masa estelar han de producir distorsiones en el continuo del espacio-tiempo. La señal mostrará una intensidad especial en las colisiones entre enanas blancas y agujeros negros [*véase* “Ondas en el espacio-tiempo”, por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2002]. Tales sucesos se han relacionado recientemente con las grandes cantidades de energía liberadas en los estallidos de rayos gamma.

Parece que sin las colisiones no es posible entender los cúmulos globulares y otros objetos celestes. Las simulaciones por computadora sugieren que la evolución de los cúmulos guarda un nexo íntimo con los sistemas binarios más estrechamente ligados, que intercambian energía y momento angular con el cúmulo como un todo. Los cúmulos se disolverían conforme los acercamientos precolisionantes arrojaran fueran las estrellas una a una. Piet Hut, del Instituto para Estudios Avanzados de Princeton, y Alison Sills, de la Universidad McMaster de Ontario, sostienen que la dinámica y la evolución estelares se regulan entre sí por medio de sutiles mecanismos de retroalimentación.

La suerte de los planetas cuyas estrellas progenitoras sufren un ceñido acercamiento estelar es un nuevo tema de investigación en la teoría de colisiones. Las simulaciones numéricas de Jarrod R. Hurley, del Museo Americano de Historia Natural de la Ciudad de Nueva York, muestran que los planetas pagan con frecuencia un alto precio: los absorben su estrella o sus hermanos planetarios, quedan sueltos, errantes por el cúmulo estelar, o hasta se los expulsa del cúmulo y se los condena a vagar por el espacio interestelar. Las observaciones tomadas con el telescopio Hubble por Ron Gilliland, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y sus colaboradores apuntan a que las estrellas de un cúmulo globular cercano carecen de planetas del tamaño de Júpiter. La causa de esta deficiencia se desconoce todavía.

A pesar de todas las preguntas aún pendientes, asistimos a un progreso espectacular en este campo. La simple idea de las colisiones estelares parecía absurda en el pasado; hoy es el tema central de muchas áreas de la astrofísica. La aparente tranquilidad del cielo nocturno quizás esté escondiendo a un universo con un poder de destrucción inimaginable, donde mil parejas de estrellas chocan en alguna parte cada hora. Y lo mejor está aún por llegar. Las nuevas técnicas permitirán pronto detectar directamente estos fenómenos. Observaremos la muerte violenta de unas estrellas mientras otras renacen, cual ave fénix, de una colisión.

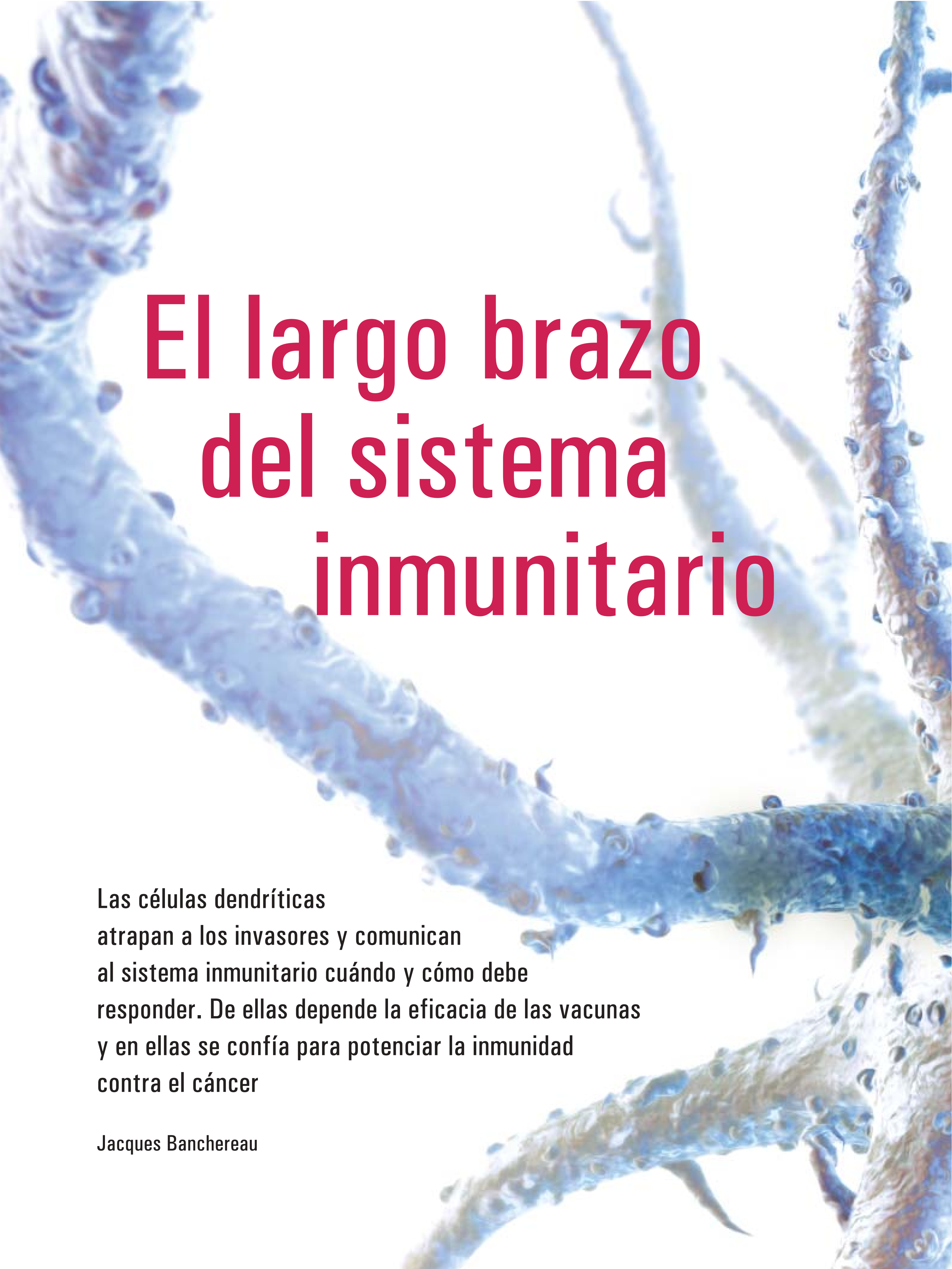
MARK A. GARLICK

Bibliografía complementaria

STAR CLUSTER ECOLOGY III: RUNAWAY COLLISIONS IN YOUNG COMPACT STAR CLUSTERS. Simon Portegies Zwart, Junichiro Makino, Stephen L. W. McMillan y Piet Hut en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 348, n.º 1, págs. 117-126; 1999.

EVOLUTION OF STELLAR COLLISION PRODUCTS IN GLOBULAR CLUSTERS -II: OFF-AXIS COLLISION. Alison Sills, Joshua A. Faber, James C. Lombardi, Jr., Frederic A. Rasio y Aaron Warren en *Astrophysical Journal*, vol. 548, n.º 1, parte 1, págs. 323-334; 10 de febrero de 2001.

THE PROMISCUOUS NATURE OF STARS IN CLUSTERS. Jarrod R. Hurley y Michael M. Shara en *Astrophysical Journal*, vol. 570, n.º 1, parte 1, págs. 184-189; 1 de mayo de 2002.



El largo brazo del sistema inmunitario

Las células dendríticas atrapan a los invasores y comunican al sistema inmunitario cuándo y cómo debe responder. De ellas depende la eficacia de las vacunas y en ellas se confía para potenciar la inmunidad contra el cáncer

Jacques Banchereau



JEFF JOHNSON

Permanecen escondidas, desplegados sus largos tentáculos, en todos los tejidos de nuestro organismo que se hallan en contacto con el entorno. En el revestimiento de la mucosa nasal y en los pulmones, por si inhalamos el virus de la gripe mientras viajamos en un apretado vagón de metro. En el tracto gastrointestinal, para alertar al sistema inmunitario si nos tragamos una dosis de bacteria salmonela. Y, sobre todo, en la piel, siempre al acecho, por si algún microorganismo penetra a través de un corte.

Son las células dendríticas, una clase de leucocitos entre los que encontramos algunos de los actores más fascinantes, aunque poco comprendidos, del sistema inmunitario. En estos últimos años, la investigación ha comenzado a descubrir los mecanismos de que se valen las células dendríticas para educar al sistema inmunitario sobre lo que pertenece a nuestro organismo y qué le es extraño, cuando no dañino. Se ha visto que las células dendríticas inician y controlan la respuesta inmunitaria. Así, resultan indispensables para el establecimiento de la "memoria" inmunitaria, que es la base de todas las vacunas. Médicos y profesionales de los laboratorios farmacéuticos se apoyan en la función que ellas desempeñan en la inmunización y "vacunan" a pacientes de cáncer con células dendríticas cargadas con trozos de sus propios tumores y, de ese modo, activan el sistema inmunitario contra el cáncer. Las células dendríticas son también responsables del fenómeno de la tolerancia inmunitaria, el proceso por el que el sistema inmunitario aprende a respetar otros componentes del organismo.

Pero las células dendríticas esconden una cara oscura. El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) se introduce en las células dendríticas para alcanzar los ganglios linfáticos, donde infecta y elimina las células T coadyuvantes, causando el sida. Por su parte, las células que se activen en el momento inoportuno podrían dar lugar a alteraciones autoinmunitarias; ocurre en el lupus. En estos casos, la supresión de la actividad de las células dendríticas podría abrirnos la puerta a nuevos tratamientos.

Escasas y valiosas

Las células dendríticas no abundan. Apenas constituyen el 0,2 por ciento de los leucocitos de la sangre y están presentes en menores proporciones aún en la piel. Por culpa de su exiguo número se ha escapado su verdadera función a los científicos durante más de un siglo desde que en 1868 las identificara Paul Langerhans, anatomista alemán que, sin embargo, las confundió con terminaciones nerviosas de la piel.

En 1973, Ralph M. Steinman, de la Universidad Rockefeller, las redescubrió en el bazo del ratón y reconoció que formaban parte del sistema inmunitario. Las células estimulaban, con una potencia inusitada, la inmunidad en animales de experimentación. Las llamó "dendríticas" en razón de sus brazos espinosos; pese a todo, se siguen denominando células de Langerhans a las dendríticas del subgrupo presente en la epidermis.

A lo largo de los 20 años subsiguientes al redescubrimiento de estas células, tenían que aislarse, para su investigación, a partir de tejido fresco mediante un proceso lento y meticuloso. Pero en 1992, cuando trabajaba en el Laboratorio francés de Schering-Plough de Investigaciones Inmunológicas en Dardilly, pergeñé, con mis colaboradores, métodos para cultivar grandes cantidades de células dendríticas a partir de células madre de médula ósea en placas de cultivo. Casi simultáneamente, Steinman junto con Kayo Inaba, de la Universidad de Kyoto publicaron que habían inventado una técnica para el cultivo de células dendríticas de ratón.

En 1994 un equipo dirigido por Antonio Lanzavecchia, ahora en el Instituto suizo de Investigación en Biomedicina en Bellinzona, y Gerold Schuller, hoy en la Universidad de Erlangen-Nuremberg, encontraron una vía para cultivar células a partir de monocitos, células leucocitarias. Sabemos ya que puede promoverse la diferenciación de los monocitos en células dendríticas, que "excitan" o "bloquean" el sistema inmunitario, o en macrófagos, que reptan por todo el organismo eliminando células muertas y microorganismos.

La posibilidad de cultivar células dendríticas ofrecía la oportunidad de investigarlas de un modo exhaustivo. Algunos de los descubrimientos iniciales ampliaron nuestra comprensión, tenue entonces, del mecanismo de operación de las células dendríticas.

Hay varios subgrupos de células dendríticas, que emergen de precursores circulantes por la sangre y se asientan, todavía inmaduras, en la piel, membranas mucosas, pulmones y bazo. Las células dendríticas inmaduras disponen de una serie de mecanismos para capturar microorganismos invasores; engullen invasores a través de receptores caliciformes en su superficie, ingieren sorbos del líquido que les rodea y succionan virus o bacterias después de encerrarlos en vacuolas. Yong-Jun Liu, antiguo compañero mío en Schering-Plough, que ahora trabaja en el Instituto de Investigación DNAX en Palo Alto, ha descubierto que algunas células

Resumen/*Células dendríticas*

- Las células dendríticas se llaman así por sus ramificaciones alargadas. Se las observa en diversos tejidos; de una manera particular en la piel y membranas mucosas. Capturan a los invasores, los trocean en antígenos y exponen los fragmentos en su superficie.
- Las células dendríticas portadoras de antígenos viajan hasta los ganglios linfáticos o hacia el bazo. Interaccionan allí con otras células del sistema inmunitario: linfocitos B, que producen anticuerpos, y células T asesinas, que atacan a los microorganismos y células infectadas.
- Las vacunas contra el cáncer preparadas con células dendríticas portadoras de antígenos tumorales se encuentran en fase de pruebas clínicas con pacientes. Se espera también poder inactivar las células dendríticas para combatir el lupus y otras enfermedades autoinmunitarias.

dendríticas inmaduras provocan la destrucción inmediata de virus con la secreción de interferón alfa.

Una vez que han engullido los cuerpos extraños, las células inmaduras los trocean en fragmentos (antígenos) que el sistema inmunitario puede reconocer. Las células hacen uso del complejo mayor de histocompatibilidad (MHC), moléculas ahorquilladas que presentan estos antígenos en su superficie. Los antígenos encajan en el MHC. Hay dos tipos del mismo, el de clase I y el de clase II. Estos dos tipos de MHC difieren en su forma y en el modo de adquirir su carga de antígenos mientras están en el interior de las células.

Las células dendríticas son muy eficientes en la captura y presentación de antígenos. Aprehenden incluso antígenos en concentraciones diminutas de éstos. Y conforme los van procesando para su presentación, viajan al bazo por la sangre o hacia los ganglios linfáticos a través de la linfa. Una vez en su destino, las células completan su maduración y presentan sus moléculas de MHC cargadas de antígeno a los linfocitos T coadyuvantes primerizos, células que hasta entonces no se habían encontrado con antígenos. Las células dendríticas son las únicas que pueden educar a los linfocitos T coadyuvantes primerizos para que reconozcan como foráneo o peligroso un antígeno. Esta capacidad singular deriva, se supone, de moléculas coestimuladoras que hay en su superficie y pueden unirse en los linfocitos T a los receptores correspondientes.

Una vez enseñadas, las células T coadyuvantes instan la intervención de los linfocitos B, que sintetizarán anticuerpos que se unirán al antígeno para su posterior inactivación. Las células dendríticas y los linfocitos coadyuvantes activan también a las células T asesinas, que pueden destruir células infectadas por microorganismos. Algunas de las células educadas por las células dendríticas se convierten en células con "memoria"; permanecen éstas en el organismo durante años — decenios quizá— para combatir al invasor en caso de que vuelva la agresión.

Que el organismo responda con anticuerpos o células asesinas parece estar determinado, en parte, por el subgrupo de células dendríticas que lleva el mensaje y por cuál de los dos tipos de sustancias inmunoestimulantes, llamadas citoquinas, instan la formación de células T coadyuvantes. En el caso de parásitos o ciertos invasores bacterianos, las citoquinas del tipo 2 son mejores, porque arman al sistema inmunitario con anticuerpos; en cambio se prefieren las citoquinas del tipo 1 para enrolar a las células asesinas en el ataque contra células infectadas por otros tipos de bacterias o por virus.

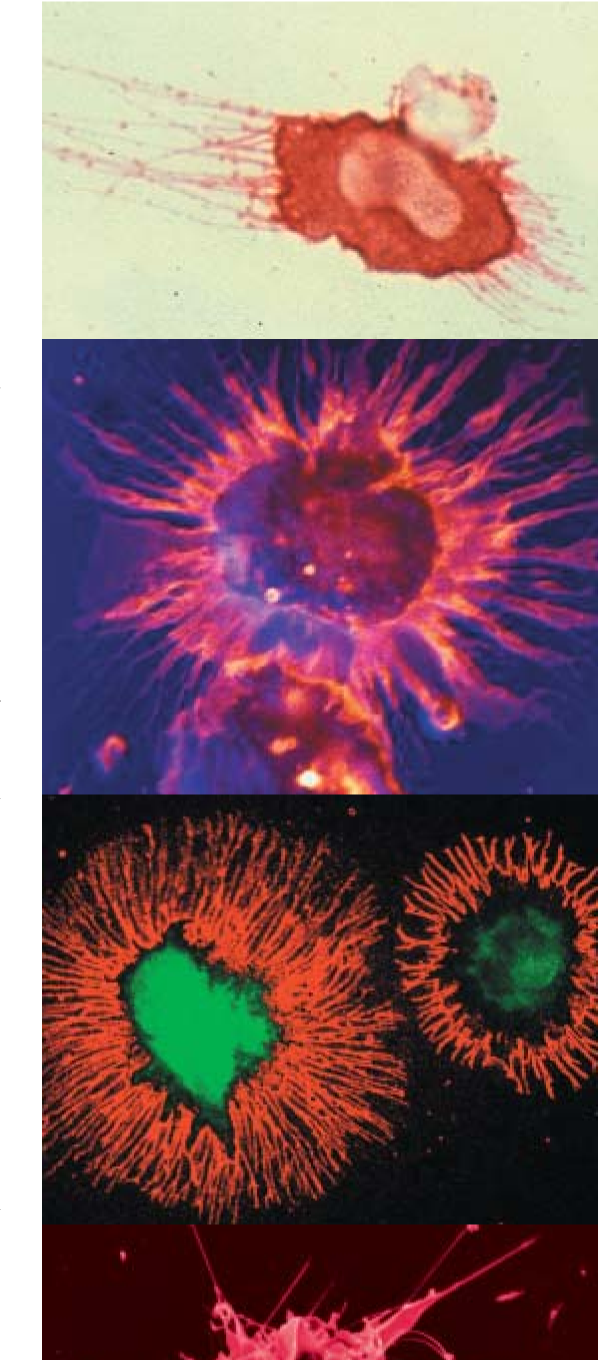
Si una célula dendrítica promueve la síntesis del tipo errado de citoquina, el organismo puede establecer una defensa equivocada. Generar el tipo de defensa adecuado por parte del sistema inmunitario puede ser una cuestión de vida o muerte: cuando se produce una exposición a la bacteria de la lepra, el sujeto que articula una respuesta de tipo 1 desarrolla una forma tuberculoide, suave, de la enfermedad, mientras que los que arman una respuesta de tipo 2 acaban con la forma lepromatosa, que es potencialmente letal.

Demoledores del cáncer

La activación de las células T coadyuvantes primerizas constituye la base de las vacunas, sean contra la neumonía, el tétanos o la gripe. Con los nuevos conocimientos sobre el papel que las células dendríticas desempeñan en la inmunidad contra los microorganismos y sus toxinas, los laboratorios empiezan a dirigir su atención hacia una nueva estrategia para combatir el cáncer.

Las células cancerosas son anormales; en cuanto tales, cabe suponer que generan moléculas que no sintetizan las células sanas. Si se pudieran diseñar fármacos o vacunas dirigidas exclusivamente contra las moléculas aberrantes, podría combatirse el cáncer sin dañar células y tejidos sanos, lo que ahorraría algunos de los efectos secundarios perniciosos de la radioterapia y la quimioterapia (caída del pelo, náuseas y debilitación del sistema inmunitario a causa de la destrucción de la médula ósea).

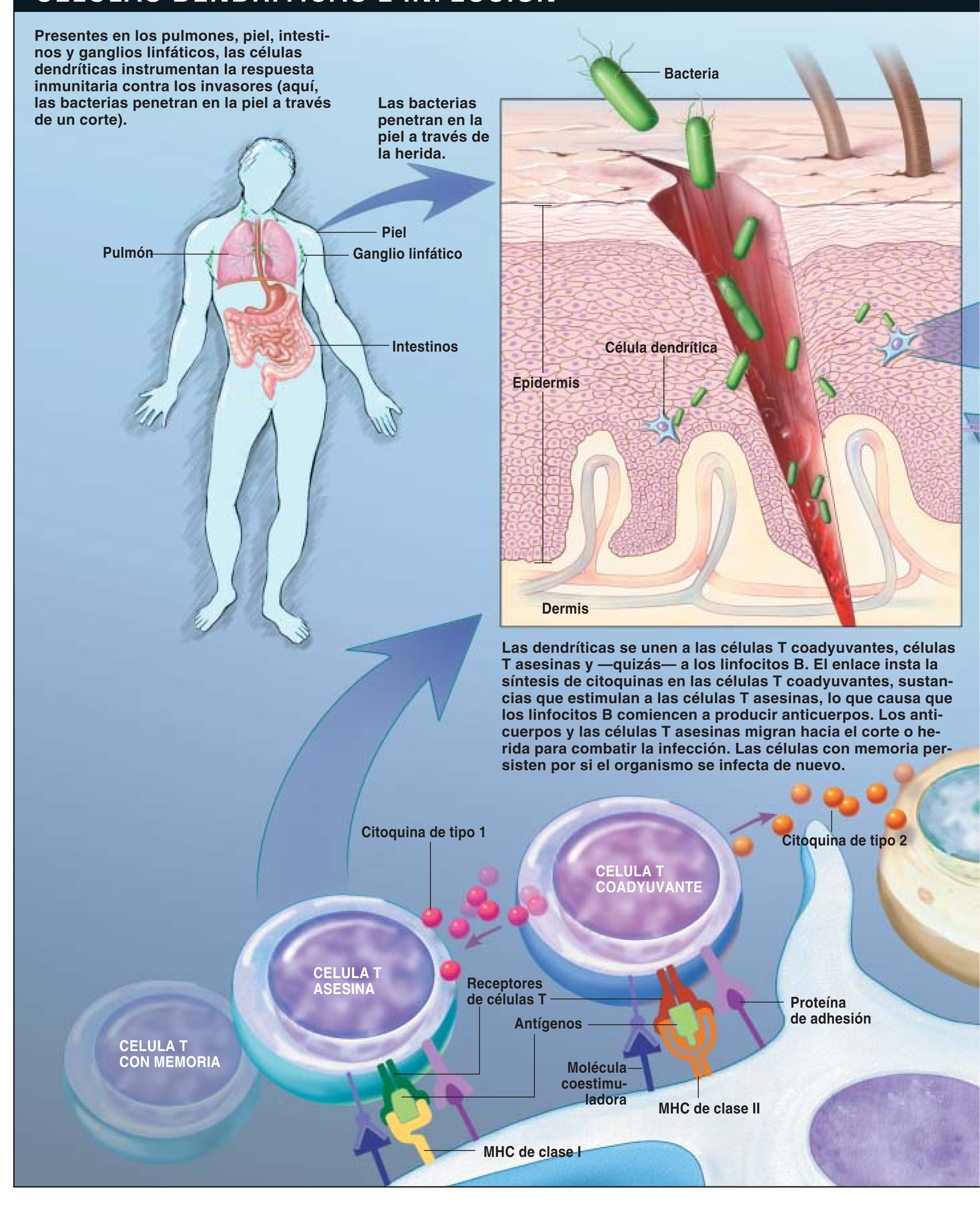
No ha sido tarea fácil encontrar los antígenos que sólo ocurren en

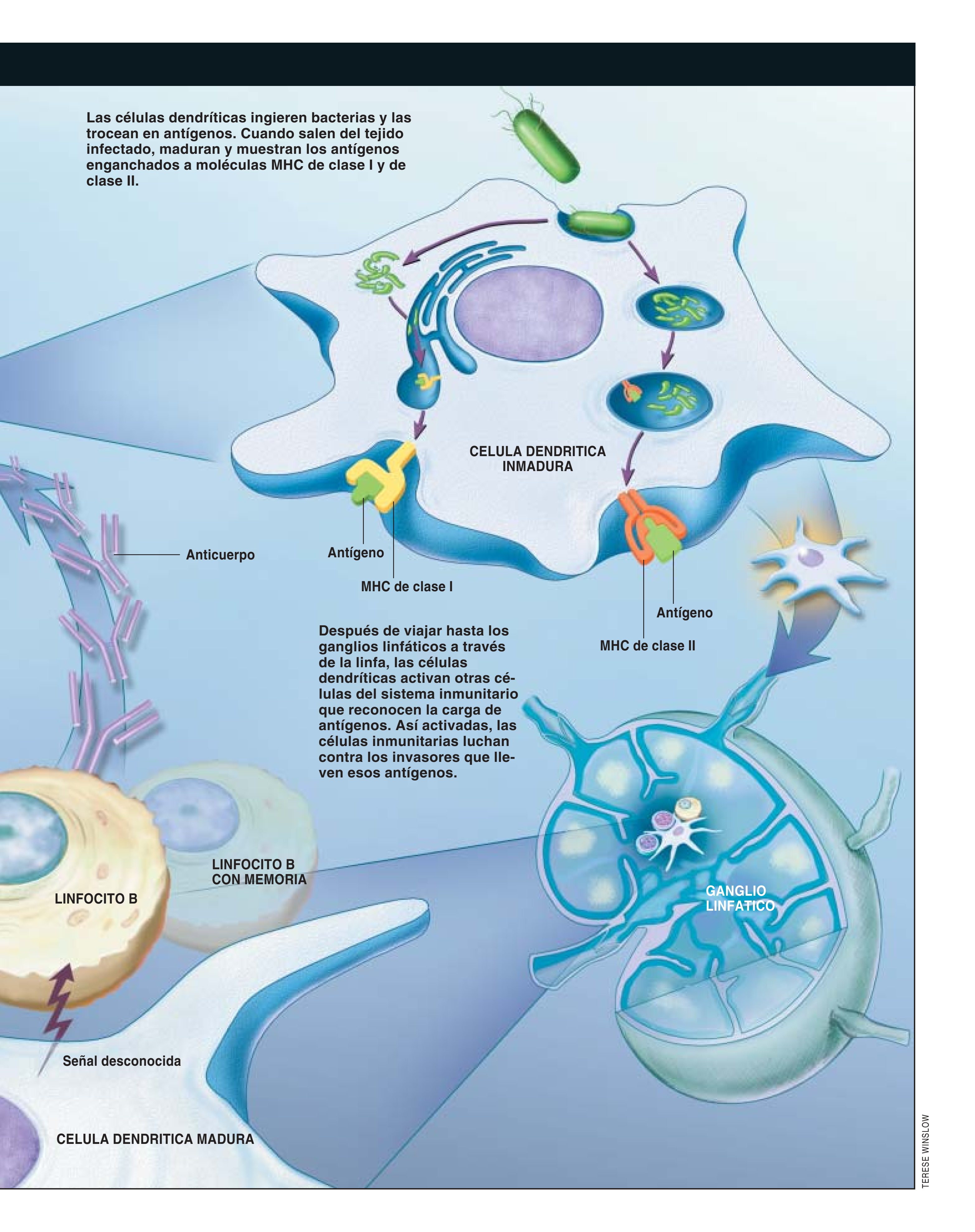


1. RAMIFICACIONES ESPINOSAS, habituales en las células dendríticas del hombre (*primer y segundo recuadros, empezando por arriba*), ratón (*tercero*) y rata (*cuarto*). La célula dendrítica de la rata se muestra en interacción con otra célula, que parece ser un linfocito T coadyuvante. A través de esas interacciones, las células dendríticas enseñan al sistema inmunitario qué es lo que debe atacar. Para preparar vacunas contra el cáncer se emplean células maduradas en el laboratorio, como la del recuadro segundo.

JACQUES BANCHEREAU (*arriba y centro superior*); OLIVIA GRESSER *Centro de Inmunología de Marseilles-Luminy INSERM/CNRS (centro inferior)*; WILLIAM E. BOWERS, STEVE HALEY Y RICHARD HUNT *Universidad de Carolina del Sur (abajo)*

CELULAS DENDRITICAS E INFECCION





Las células dendríticas ingieren bacterias y las trocean en antígenos. Cuando salen del tejido infectado, maduran y muestran los antígenos enganchados a moléculas MHC de clase I y de clase II.
CELULA DENDRITICA INMADURA
Antígeno
MHC de clase I
Anticuerpo
Antígeno
MHC de clase II
Después de viajar hasta los ganglios linfáticos a través de la linfa, las células dendríticas activan otras células del sistema inmunitario que reconocen la carga de antígenos. Así activadas, las células inmunitarias luchan contra los invasores que lleven esos antígenos.
LINFOCITO B CON MEMORIA
LINFOCITO B
GANGLIO LINFATICO
Señal desconocida
CELULA DENDRITICA MADURA
TERESE WINSLOW

Vacunas potenciales contra el cáncer basadas en células dendríticas

NOMBRE DE LA COMPAÑIA	SEDE CENTRAL	TIPO DE CANCER	PRUEBAS ACTUALES*
Laboratorios ML	Warrington	Melanoma	En fase I
Dendreon	Seattle	Próstata, mama, ovario, colon, mieloma múltiple	Fase III (próstata), fase II (próstata, mieloma múltiple), fase I (mama, ovario, colon)
Genzyme	Framingham	Riñón, melanoma	Fase I (riñón), fase II (melanoma)
Inmuno-Designed Molecules	París	Próstata, melanoma	Fase II
Merix Bioscience	Durham	Melanoma	En fase I
Oxford BioMedica	Oxford	Colorrectal	Fase I/II
Zycos	Lexington	Vacuna de ADN contra distintos tumores	Fases I y II

** Las pruebas de fase I evalúan la seguridad en un número pequeño de pacientes; las fases II y III valoran la capacidad de estimular el sistema inmunitario y la eficacia en un número mayor de pacientes.*

las células cancerosas, pero se ha conseguido ya aislar varios de ellos, principalmente del melanoma, un cáncer de la piel. A comienzos de los años noventa, los grupos de Thierry Boon, del Instituto Ludwig contra el Cáncer en Bruselas, y de Steven A. Rosenberg, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, identificaron, de forma independiente, antígenos específicos de melanoma que han pasado ya a la fase de prueba clínica.

En estas pruebas se emplean habitualmente vacunas preparadas con células precursoras de células dendríticas, que se han aislado de pacientes de cáncer y cultivadas en el laboratorio junto con antígenos tumorales. Durante este proceso, las células dendríticas captan los antígenos que trocean y presentan en su superficie. De acuerdo con el guión, cuando se inyectan de nuevo a los pacientes cabe esperar que las células dendríticas, cargadas con antígenos, despierten la respuesta inmunitaria de los pacientes contra sus propios tumores.

Frank O. Nestle, de la Universidad de Zurich, Ronald Levy y Edgar G. Engleman, de Stanford, y otros expertos del sector privado están comprobando la eficacia de este enfoque en tipos de cáncer muy dispares: melanoma, linfoma de linfocitos B y tumores de la próstata o del colon. Se han cosechado algunos indicios de éxito. En septiembre de 2001, por ejemplo, mis colaboradores y yo publicamos nuestros propios resultados: de 18 pacientes con melanoma avanzado, a los que habíamos inyectado células dendríticas cargadas con antígenos de melanoma, 16 manifestaron en las pruebas de laboratorio signos de una mejoría en la respuesta inmunitaria frente al cáncer que padecían. Y lo que revestía mayor interés, se frenó el ritmo de crecimiento del tumor en los nueve pacientes que expresaron respuesta contra más de dos antígenos.

Se trabaja en el refinamiento del método. Las pruebas abarcan una muestra más extensa. Hasta el momento, las vacunas contra el cáncer basadas en células dendríticas se han aplicado sólo a pacientes con cáncer avanzado. Aunque se supone que los pacientes con cáncer precoz responderían mejor a la terapia —su sistema inmunitario no ha intentado todavía, sin éxito, erradicar el tumor— persisten algunos problemas potenciales que merecen consideración.

Hay quienes temen que este tipo de vacunas podría desencadenar, por error, un ataque inmunitario contra el tejido sano. A este respecto, se ha observado vitíligo —manchas blancas en la piel resultantes de la destrucción de melanocitos normales productores de pigmentos— en pacientes de melanoma que recibieron las primeras vacunas de melanoma. Por otro lado, los tumores podrían mutar y "escapar" del ataque del sistema inmunitario generado por la vacuna de células dendríticas. Las células tumorales podrían conseguir esa evasión al dejar de producir los antígenos contra los que debía arremeter un sistema inmunitario estimulado por la vacuna. Este problema no es, sin embargo, exclusivo de las células dendríticas; puede darse el mismo fenómeno con las terapias tradicionales del cáncer.

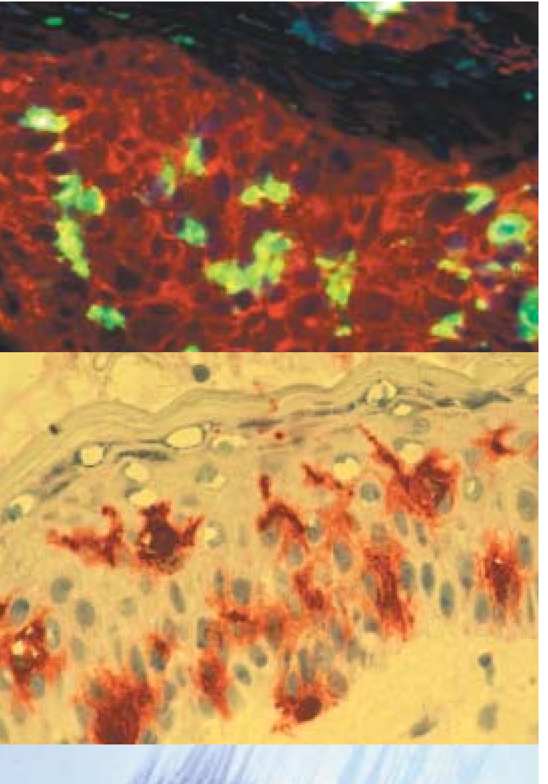
Además, la preparación cuidadosa de una vacuna con células dendríticas para combatir el tumor de un determinado paciente podría no ser económicamente viable. Por eso son muchos los científicos que se afanan en mejorar esos pasos tan costosos y lentos para aislar células de pacientes, manipularlas en el laboratorio y reinyectarlas después.

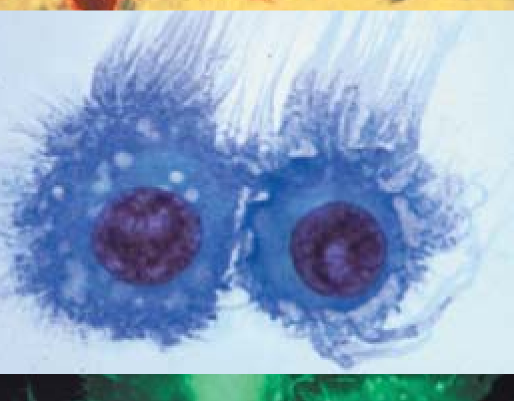
En cierta línea de investigación se movilizan los precursores de las

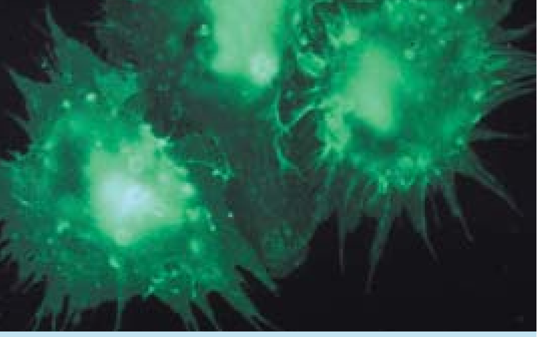
El autor

JACQUES BANCHEREAU dirige, desde 1996, el Instituto Baylor de Investigaciones Inmunológicas en Dallas. En ese centro se investiga la forma de intervenir en el sistema inmunitario para el tratamiento del cáncer, enfermedades autoinmunitarias y patologías infecciosas.

JACQUES BANCHEREAU (*arriba y centro*); MATTHEW L. ALBERT *Universidad de Rockefeller* (*abajo*)







2. TINCION DE CELULAS DENDRITICAS INMADURAS. Aparecen con color verde en el tejido del cáncer de mama (*recuadro superior*) y de color rojo en la piel normal (*segundo recuadro*). Conforme van madurando, sintetizan proteínas que facilitan su mutua adhesión (*recuadro inferior*). También producen receptores con forma de horquilla (*puntos verdes, abajo*), que usan para mostrar fragmentos de los invasores a otras células inmunitarias.

células dendríticas presentes en el organismo para que se dividan y comiencen a orquestar una respuesta inmunitaria contra los propios tumores. El equipo de David H. Lynch, de Immunex en Seattle, ha descubierto una citoquina estimuladora, en los ratones, de la multiplicación de células dendríticas, que, a la postre, inducen a los animales a rechazar tumores injertados. Drew M. Pardoll, de la Universidad Johns Hopkins, y otros han observado algo notable en células tumorales transformadas mediante ingeniería genética para que segreguen grandes cantidades de citoquinas, activadoras de células dendríticas: poseen el mejor potencial como vacunas contra el cáncer.

Supresión de la inmunidad

Al propio tiempo, otros buscan caminos para suprimir la actividad de las células dendríticas cuando, en vez de combatir la enfermedad, la exacerban. En el fenómeno habitual conocido como tolerancia central, el timo libera linfocitos T jóvenes que reconocen los propios componentes del organismo como extraños antes de que tengan la oportunidad de incorporarse a la circulación. Algunos inevitablemente se escapan, por lo que el organismo tiene un mecanismo de reserva para restringir su actividad.

Pero la tolerancia periférica, así se llama el mecanismo en cuestión, aparece desarticulada en pacientes con artritis reumatoide, diabetes de tipo 1 o lupus eritematoso sistémico, alteraciones todas ellas autoinmunitarias. No hace mucho, mi grupo informó que las células dendríticas de la sangre de pacientes con lupus desarrollaban una actividad impropia. Las células de estos pacientes liberan cantidades elevadas de interferón alfa, una proteína inmunoestimuladora que insta el desarrollo de las células precursoras para dar células dendríticas maduras cuando todavía se encuentran en la sangre. Las células maduras ingieren entonces ADN, presente en cantidades insólitas en la sangre de pacientes con lupus; eso, a su vez, provoca que el sistema inmunitario del individuo genere anticuerpos contra su ADN. Los anticuerpos así formados acarrean complicaciones del lupus; la vida del enfermo corre peligro cuando se depositan en los riñones o en las paredes de los vasos sanguíneos. Ante ese cuadro, proponemos que el bloqueo del interferón alfa podría facilitar un tratamiento del lupus al prevenir la activación de las células dendríticas. Una estrategia similar podría impedir, en receptores de un trasplante, el rechazo de los nuevos tejidos.

De una mejor comprensión de las células dendríticas podría derivarse también un nuevo tratamiento del sida. En el año 2000 Carl G. Figdor e Yvette van Koyk, del Hospital Clínico San Radboud en Nimega, identificaron un subgrupo de células dendríticas que producen DC-SIGN, una molécula que puede unirse a la cubierta externa del VIH. Estas células aprehenden el VIH mientras reptan a través de las membranas mucosas y tejidos profundos. Cuando viajan a los ganglios linfáticos, descargan el virus ante una concentración elevada de linfocitos T. Los fármacos que bloquean la interacción entre el DC-SIGN y el VIH podrían frenar la progresión del sida.

Otras enfermedades infecciosas —sarampión, malaria y citomegalovirus, entre ellas— manipulan también las células dendríticas para su provecho. Los hematíes infectados con parásitos de la malaria, por ejemplo, se unen a las células dendríticas y evitan que maduren y alerten al sistema inmunitario de la presencia de los invasores. Varios grupos investigan cómo evitar que esos microorganismos secuestren células dendríticas; algunos ensayan con células dendríticas supercargadas para luchar contra las infecciones.

Conforme vayamos conociendo mejor las moléculas que controlan las células dendríticas, conseguiremos también medios que nos permitirán hacer uso de su potencial terapéutico.

Bibliografía complementaria

DENDRITIC CELLS AND THE CONTROL OF IMMUNITY. Jacques Banchereau y Ralph M. Steinman en *Nature*, vol. 392, págs 245-252; 19 de marzo de 1998.

DENDRITIC CELLS AS VECTORS FOR THERAPY. Jacques Banchereau, Beatrice Schuler-Thurner, A. Karolina Palucka y Gerold Schuler en *Cell*, vol. 106, n.º 3, págs. 271-274; 10 de agosto de 2001.

Ciencia y sociedad

Calisto

Un océano en sus entrañas

Hace poco más de tres años la nave *Galileo* descubrió que el campo magnético de Júpiter era alterado en las cercanías de Calisto por un campo magnético local, inducido en este satélite por las poderosas corrientes de plasma existentes en el entorno del mayor de los planetas del sistema solar. El mismo fenómeno sucedía en Europa. Más tarde se encontró también en Ganímedes.

La única interpretación que parece verosímil es que los campos magnéticos se generen en capas de agua salada, de al menos varios kilómetros de espesor, bajo la superficie de estos satélites jovianos. Se trataría, literalmente, de océanos subterráneos.

Con anterioridad a la misión *Galileo* se pensaba que Calisto se hallaba prácticamente "indiferenciado". Es decir, su interior consistiría en una mezcla más o menos homogénea de hielo, roca y metal; también, que el hielo no se habría fundido nunca, o de lo contrario la roca y el metal se habrían acumulado hacia las partes centrales del satélite debido a su mayor densidad.

Pero tras el análisis detallado de la trayectoria de la *Galileo* en las cercanías del satélite, se ha llegado a la conclusión de que Calisto presenta cierto grado de diferenciación. Parece tener una capa externa de agua (con este método no se puede distinguir si ésta se encuentra líquida o helada, debido a que la densidad sería parecida en los dos casos) de hasta 350 km de espesor, en acuerdo con la posible existencia de un océano interno, envolviendo un interior que seguramente permanece en gran medida sin diferenciar.

Un océano interno en Europa puede mantenerse sin congelar merced al calentamiento disipado por fricciones mareales originadas por su órbita excéntrica en el campo gravitatorio de Júpiter (este mismo proceso, pero a una escala mayor, da lugar a la intensa actividad volcánica exhibida por el vecino Io). Ganímedes puede haber sido calentado por mareas durante algunas fases de su historia geológica, quizás incluso recientemente. Pero en Calisto el calor aportado por las mareas puede considerarse despreciable, por lo que la existencia de un océano interno suponía un serio desafío a las teorías en vigor; más aún, cuando no parece haber dispuesto de energía suficiente para haber completado la separación de sustancias ligeras y densas en su interior.

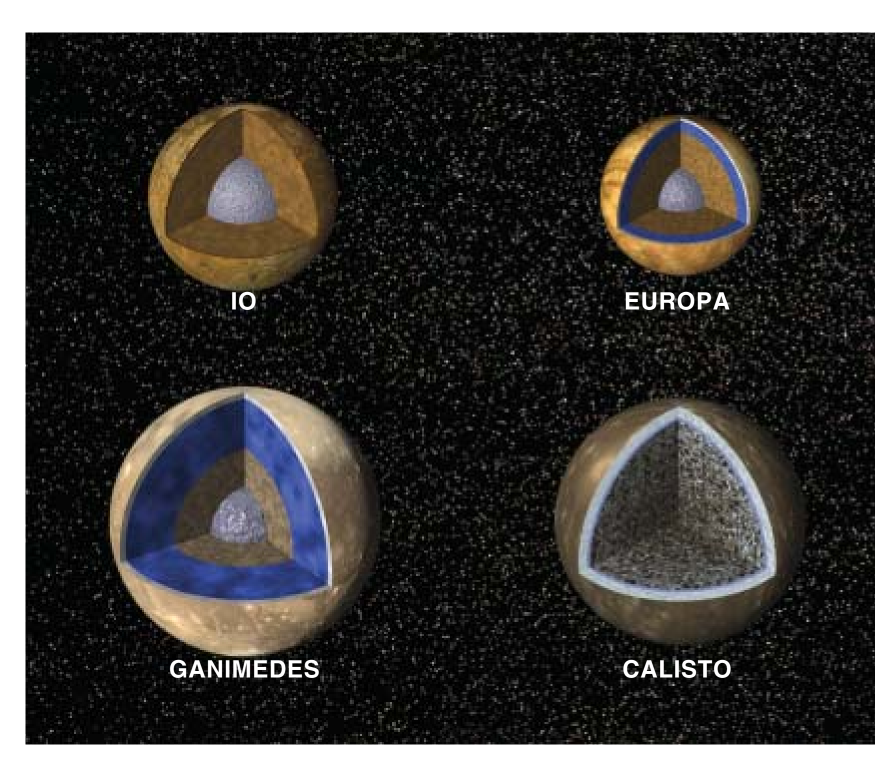
En un artículo clásico publicado en 1979, Ray Reynolds y Patrick Cassen, entonces en el Centro de Investigación Ames de la NASA, concluyeron que una corteza de hielo flotando sobre un océano en un gran satélite de hielo (como Calisto) sería inestable frente a la convección en estado sólido. La eficacia de este proceso para extraer calor desde el interior es tal, que, una vez iniciado, debe llevar a la congelación de cualquier capa de agua líquida en un tiempo de a lo sumo unos cientos de millones de años. Se trata de un intervalo muy corto, comparado con la edad del sistema solar; por eso se aceptaba que ningún océano interno podría haber sobrevivido en Calisto hasta la actualidad. Para evitar que el agua líquida se congele se puede recurrir a la existencia de sustancias anticongelantes (por ejemplo, el amoníaco puede bajar el punto de fusión del hielo incluso en unos 100 grados centígrados).

El modelo de Reynolds y Cassen consideraba (por simplicidad) que la viscosidad del hielo depende exclusivamente de la temperatura (un fenómeno que recibe la denominación técnica de viscosidad newtoniana), disminuyendo exponencialmente con el aumento de la misma. Desde entonces ésta ha sido una premisa básica en los estudios sobre satélites de hielo.

Pero los experimentos de laboratorio muestran que el hielo de agua es, en realidad, un material no newtoniano, lo que significa que su viscosidad depende de la temperatura y de los esfuerzos que se le aplican; cuanto menores son los esfuerzos mayor es la viscosidad, y en el interior profundo de la corteza de Calisto los esfuerzos son muy bajos, mucho me-



1. Fotografía de Calisto tomada por la nave Galileo en mayo de 2001, única imagen global en color del satélite tomada por esta sonda. En la imagen se observa que la superficie se encuentra salpicada de cráteres de impacto, lo que atestigua que su antigüedad se remonta a los primeros tiempos del sistema solar



2. Estructura interna de los cuatro grandes satélites galileanos de Júpiter mostrados a una misma escala

nores que en una corteza torturada por mareas.

Por tanto, un estudio más riguroso de la dinámica de la capa de hielo de Calisto (y por extensión, del resto de satélites helados del sistema solar exterior) debe tener en cuenta la naturaleza no newtoniana del hielo. Cuando ésta se considera en los cálculos se obtiene que la corteza externa de hielo de Calisto es estable frente a la convección, lo cual implica que la energía aportada por los isótopos radiactivos presentes en la fracción rocosa debe bastar para permitir a un océano interno escapar de la congelación y sobrevivir hasta la actualidad. Eso sí, a una profundidad de cien kilómetros bajo la superficie.

Así pues, sin necesidad de recurrir a sustancias anticongelantes o a otras condiciones especiales, la existencia de agua líquida en el interior de Calisto puede constituir una consecuencia inevitable de la dinámica interna de un gran satélite helado. Dinámica que puede ser muy distinta de la considerada hasta ahora. Si la convección es más difícil de iniciar en las capas externas de satélites de hielo de lo que se había venido pensando, entonces la existencia de océanos internos puede resultar un fenómeno bastante común. Concretamente, debería esperarse la presencia de océanos internos en grandes satélites como Ganímedes y Titán.

JAVIER RUIZ
Departamento de Geodinámica
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense
de Madrid
jaruiz@geo.ucm.es

Proteínas BAG

Claves para la vida y la muerte de las células

A lo largo de la vida de un organismo, ciertas células experimentan mutaciones genómicas que pueden dar lugar a una proliferación incontrolada de las afectadas y a su migración; en otros términos, pueden originar cáncer y metástasis. Por razones de supervivencia, se trata de células que deben eliminarse. ¿Cómo? Mediante una respuesta compleja que implica una fina coordinación de episodios intracelulares cuya meta última es la muerte de la célula indeseable; dicho de otro modo, el suicidio celular. Recibe el nombre de apoptosis este proceso de muerte celular programada.

Cuando fracasan las rutas apoptóticas, fenómeno común observado en los cánceres, se tornan insensibles las células ante las señales de inducción de muerte. De ese modo, los tumores cancerígenos oponen resistencia a los mecanismos de autodefensa del organismo y a los agentes quimioterapéuticos. Dado que una quimioterapia eficaz dependerá de la inducción de apoptosis, resultará harto difícil tratar los cánceres renuentes a las señales de autodestrucción. Por consiguiente, cualquier desequilibrio entre proliferación y muerte celular será crucial en la fisiopatología del cáncer.

Recientemente se ha identificado una nueva familia de proteínas reguladoras anti-apoptóticas. En los humanos, conforman esa familia las proteínas BAG1, BAG2, BAG3, BAG4, BAG5 y BAG6. Se conocen, además, proteínas afines en muchos otros organismos, de insectos a plantas, pasando por gusanos y levaduras. La más estudiada es BAG1 (también conocida como RAP46 o HAP46), el miembro originario de la familia.

En el cáncer abunda la proteína BAG1. Para promover la agresividad tumoral recurre a mecanismos muy varios. Forma complejos con otras proteínas que intervienen en el control de la proliferación celular y, así, aumenta la actividad de las mismas. Los altos niveles de BAG1 prolongan la supervivencia celular en ausencia de factores de crecimiento, moléculas que la célula normal utiliza para su persistencia y multiplicación.

La proteína BAG1 revierte la suspensión del crecimiento decretada por el supresor de tumor p53, suerte de "ángel guardián" del genoma. Arruina la exigencia normal de adhesión celular al facilitar la supervivencia de células libres, con lo que deja el camino expedito para la movilidad y migración metastásica de las células tumorales. Por último, los niveles incrementados de BAG1 en

Premios Rolex a

Los proyectos galardonados con los premios Rolex a la iniciativa sacan partido de técnicas e ideas científicas que, con un coste más o menos reducido y sin que haya que contar con grandes infraestructuras, sino más bien sólo con el empeño de unas pocas personas, alivian la situación de comunidades pobres o protegen enclaves y especies naturales. Los proyectos escogidos están íntimamente ligados a individuos concretos, a cuya sola obstinación hay que agradecer que se pusieran en marcha. Cinco personas así han recibido en octubre de 2002 la distinción.

El ingeniero eléctrico David Irvine-Halliday, de la Universidad canadiense de Calgary, ha llevado el alumbrado a las aldeas más remotas de Nepal por medio de lámparas de nueve diodos emisores de luz blanca (buscó durante todo un año algún fabricante de ese tipo de fuente; por fin, en 1998 dio con la casa japonesa Nichia, que los construye añadiendo una capa de fósforo a un diodo ordinario de luz azul). Sólo 200.000 hogares, de los tres millones y medio del país, están conectados a la red eléctrica de manera fiable. Esas lámparas, alimentadas por un generador sencillo y una turbina de viento, iluminan una aldea de sesenta casas con la energía que consume una bombilla de 100 watt.

El biólogo francés Michel André ha diseñado un sistema que detecta la presencia de cetáceos gracias a los sonidos característicos que emiten, para así avisar a los buques de su presencia y evitar que los atropellen. Hasta ahora, para impedir esos choques se procedía al revés: se expedían señales acústicas que ahuyentaban a los animales. Este sistema, según André, no sólo es ineficaz, sino que perturba la capacidad auditiva de los cachalotes. André reside desde 1992 en las Islas Canarias. La Compañía Transmediterránea le contrató para que averiguase la razón de que cada vez abundasen más las colisiones entre barcos y ballenas. André llegó a la conclusión de que el motivo era la pérdida de oído de estos animales, que se constata fisiológicamente en las autopsias; las causan los ruidos de los numerosos barcos que navegan por las aguas canarias y el



Los ferrys cortan como cuchillos la carne de las ballenas

percutir de las perforaciones submarinas o de los estudios sísmicos. Las Islas albergan 27 especies de cetáceos, con una población de entre 300 y 350 cachalotes. Cada año matan las colisiones entre seis y diez cachalotes, eso contando sólo los cadáveres varados, y docenas de pasajeros sufren lesiones. El “sistema contra las colisiones con ballenas” ideado por André y sus colaboradores de diversas universidades creará una zona de seguridad para los cachalotes. Constará de 12 boyas, equipadas con hidrófonos —micrófonos sumergidos—; se espaciarán de diez en diez kilómetros a lo largo de los 120 que separan Tenerife y Gran Canaria.

El biólogo Gordon Sato, estadounidense de ascendencia japonesa, estuvo internado durante la Segunda Guerra Mundial con su familia en el campo de concentración de Manzanar, palabra con la que ahora ha denominado el pro-

el cáncer llevan a que las células opongan resistencia a los fármacos que inducen la muerte celular.

A su vez, los otros miembros de la familia BAG aparecen en concentraciones elevadas en determinados tipos de cáncer. Interaccionan con proteínas específicas y protegen contra la muerte celular.

¿Cuál es la base molecular de ese comportamiento contrario al suicidio celular que caracteriza a las proteínas BAG? Todas las investigadas comparten un mismo motivo, el “dominio BAG”, que se une a las proteínas de shock térmico dentro de la familia Hsp70 y modula su actuación.

Las proteínas Hsp70 despliegan un amplio abanico de funciones. Exhiben propiedades anti-apoptóticas. Ayudan a que las células puedan hacer frente al estrés. A ciertas concentraciones, protegen contra agentes inductores de muerte celular, incluidos los fármacos anticancerosos. Actúan como chaperonas moleculares: contribuyen al plegamiento de proteínas recién sintetizadas, impiden la agregación de proteínas mal plegadas y colaboran en el replegamiento de las mismas. No terminan ahí sus funciones. Facilitan la translocación de proteínas a través de las membranas de los compartimientos celulares, montan y desmontan complejos multiproteicos, instan la degradación de proteínas inestables y controlan la actividad biológica de proteínas reguladoras.

Desde el punto de vista estructural, las Hsp70 constan de un dominio ATPasa y otro que se une al sustrato. Este segundo dominio interactúa con motivos “pegajosos” de las proteínas diana; con ello, impiden la agregación y favorecen el cambio conformacional. El dominio ATPasa impulsa ciclos de unión y disgregación de la proteína diana, a través de la hidrólisis del trifosfato de adenosina (ATP), el carburante celular.

En estos procesos, las proteínas BAG desempeñan la función de cofactores chaperona o “co-chaperonas”. Se unen al dominio ATPasa, estableciendo contactos con lóbulos a ambos lados de la hendidura que cobija al ATP, forzando así una mayor apertura de la misma. Resultado de ello, se incrementa la actividad ATPasa, al tiempo que condiciona la unión y repliegue del sustrato por las proteínas Hsp70.



Plantar mangles en la bahía ayuda a la supervivencia de los eritreos

yecto por el que se le premia. En la situación de la minoría eritrea en Etiopía, poco antes de su independencia, percibió un cierto paralelismo con aquella experiencia. Conoció Eritrea en 1985, y desde su jubilación en 1992 pasa allí cada año al menos seis meses. En la bahía de Massawa, una de las zonas más áridas del mundo, radican las actividades de Manzanar. El mangle es un arbusto que se da en las lagunas costeras. Sato, con sus colaboradores eritreos, descubrió que necesitaba del nitrógeno, fósforo y hierro que aportan las lluvias, que allí caen sólo unos pocos días al año. Idearon una manera de añadir esos elementos de manera directa al agua de mar, que carece de ellos. Los dos primeros se guardan en unas bolsas de plástico, perforadas con pequeñas aberturas, que se entierran bajo la arena de la marisma, junto a los plantones. El hierro se introduce por medio de una malla de alambre y pequeños pedazos sacados de material militar abandonado por la zona. La variedad de mangle escogida, *Avicennia marina*, sirve de forraje y como leña para el fuego; además, crea un hábitat para peces y crustáceos.

Dos especies de grulla, la del paraíso (*Anthropoides paradiseus*), ave nacional de Sudáfrica, y la carunculada (*Bugeranus carunculatus*), corren grave riesgo de extinguirse. Lindy Rodwell ha contribuido a que las cosas hayan mejorado algo en su país, Sudáfrica, donde la carunculada, la mayor de las grullas africanas y la más sensible a la preservación de los humedales, se encuentra aún en "peligro crítico". En los otros diez países africanos donde mora la carunculada está formando, con la ayuda de la Fundación Internacional de la Grulla, equipos que trabajan por la conservación de la especie. En octubre de 2001 efectuó con sus colaboradores la primera observación coordinada de sus poblaciones africanas. Sólo se encontraron siete mil ejemplares, en vez de los trece o quince mil que se esperaban.

Jorge Márcio Ayres, primatólogo, alarmado por la desaparición del hábitat del mono uacari, propuso la creación de una reserva de once mil kilómetros cuadrados que protegiese los simios y la várzea, o selva inundada. Sus esfuerzos condujeron a la fundación de la Estación Ecológica de Mamirauá en 1990, que dirige el propio Ayres. Pero las normas que rigen los parques naturales obligaba a trasladar a los habitantes de la zona. Ayres llegó a desafiar la ley: cree que un entorno natural debe conservarse sin prescindir de la población humana autóctona que lo habite. Con los nativos preparó un plan de conservación; los convirtió en coadministradores del proyecto. Por fin, en 1996 se establecía la Reserva de Desarrollo Sostenible de Mamirauá, conforme a una categoría jurídica nueva. Dos años después se fundaba la de Amanã, 23.500 kilómetros cuadrados con 3000 habitantes. Como conecta Mamirauá con el Parque Nacional de Jaú, se ha creado así el Corredor del Amazonas Central, el mayor trecho en el mundo de pluviselva protegido oficialmente.

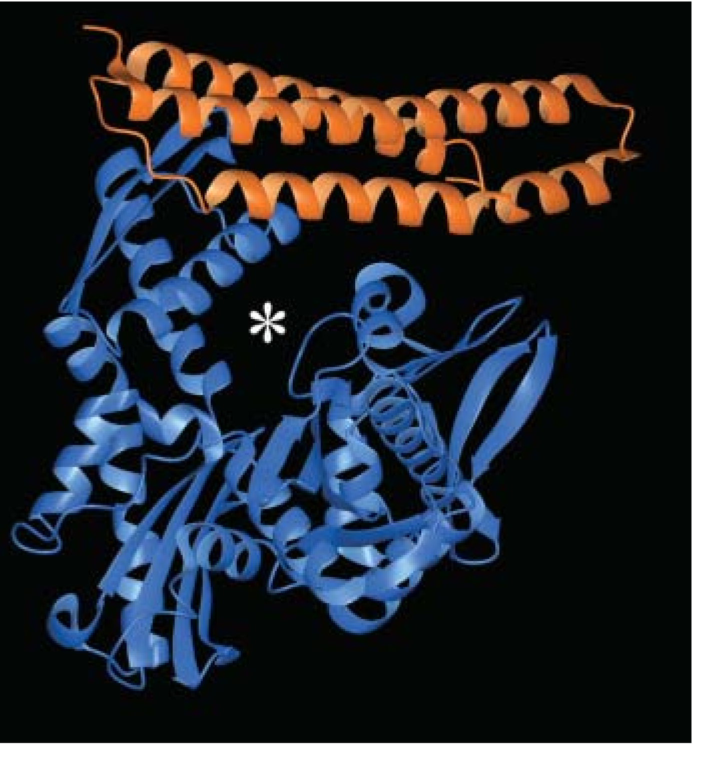
BAG1 forma complejos con proteínas que controlan el crecimiento y muerte celular. En esa configuración, modula la función de la proteína acompañante. Es probable que la capacidad de BAG1 para inhibir o estimular tales proteínas reguladoras dependa de su interacción con chaperonas Hsp70, habida cuenta de que suele requerirse el dominio BAG para dicha actividad.

BAG1 se agrega con la proteína bcl-2, un potente inhibidor de muerte celular. Con éste coopera en su labor supresora de la apoptosis. Unida a la proteína Siah, impide que desarrolle su función, que es la de controlar el reciclaje de varias proteínas importantes para el crecimiento celular y cáncer. BAG1 actúa también como estimulador o inhibidor de receptores de factores de crecimiento y de hormonas esteroideas. Los receptores de factores de crecimiento, unidos a sus ligandos, fosforilan determinadas proteínas y desencadenan una secuencia de señales que conducen a la supervivencia y proliferación celular.

Vale la pena detenerse en los receptores de hormonas esteroideas, que forman complejos con la hormona-ligando y se trasladan hasta el núcleo, donde interaccionan con secuencias específicas de ADN. En razón de ese mecanismo, se estimula o suprime la producción de ciertas proteínas, lo que repercute en la viabilidad, crecimiento y diferenciación de la célula. Teniendo en cuenta que BAG1 acrecienta la actividad de los receptores de andrógenos y estrógenos, y capacita a las células para responder a bajos niveles de hormona, cabe inferir su intervención en la amortiguación de la respuesta al tratamiento antihormonal y al crecimiento hormona-independiente de algunos tumores de mama y próstata.

Por último, aunque no por ello menos importante, BAG1 activa la quinasa Raf-1, una proteína reguladora que aporta señales para el crecimiento celular. Raf-1 y Hsp70 compiten por formar complejos con BAG1, auténtica llave conmutadora entre las fases de reposo y crecimiento celular. En condiciones de estrés, suben los niveles de Hsp70, desplazando a Raf-1 de su complejo con BAG1; de ese modo frena la proliferación celular.

Con las proteínas reguladoras forman complejos, a su vez, otros miembros de la familia BAG. Así



Esquema molecular del dominio BAG de BAG1 (anaranjado) *unido al dominio ATPasa de Hsc70* (azul)*, una proteína de la familia de chaperonas Hsp70. El surco que cobija al ATP está indicado por un asterisco* (*)*. La estructura fue determinada mediante cristalografía de rayos X por el grupo de Hartl y Moarefi en el Instituto de Bioquímica Max-Planck en Martinsried (Alemania)*

ocurre con BAG3 y la fosfolipasa C-γ, una enzima decisiva en el mecanismo celular de señalización. BAG4, también conocida como “silenciadora de dominios muerte” (SODD), se une a los dominios letales del receptor 1 del factor de necrosis tumoral (FNT) y al receptor letal 3. Estos receptores se agregan en presencia de sus ligandos, desencadenando con ello una cascada de señales inductora de apoptosis. Se ha especulado que BAG4 recluta chaperonas para los receptores del FNT con el fin de impedir la autoagregación del receptor y prevenir la señalización en ausencia de ligando. Por último, BAG6, originariamente conocida como “guadaña”, constituye la diana de la “segadora”, proteína que es inductora potente de muerte celular. Tras su captura por la segadora, BAG6 libera una chaperona y un factor de apoptosis, éste todavía por identificar. Poco es lo que se conoce concerniente a la función de BAG2 y BAG5.

De lo expuesto, cabe concluir que las proteínas BAG se ubican estratégicamente en puntos de cruce de numerosas rutas de señalización celular. Operan como llaves conectoras y adaptadoras moleculares, al par que modulan la función de las chaperonas Hsp70. A la vez, articulan un novedoso mecanismo para la regulación del cáncer y, en condiciones normales, de la proliferación, diferenciación y muerte celular.

No obstante lo avanzado en el conocimiento de las diversas funciones que cumple la familia de proteínas BAG en los procesos fisiopatológicos, quedan pendientes retos importantes, en particular por lo que concierne a la terapia del cáncer y de otras enfermedades.

KLÁRA BRIKNAROVÁ
Instituto Burnham
La Jolla, California
MIGUEL LLINÁS
Universidad Carnegie Mellon
Pittsburgh, Pennsylvania

Inestabilidad genómica

Sus causas

La simple observación microscópica de los cromosomas de cualquier célula tumoral presenta un panorama dantesco: pérdidas o ganancias de cromosomas enteros, reorganizaciones masivas de los cromosomas, deleciones, duplicaciones, inversiones y otras alteraciones.

Sin embargo, aun cuando el conocimiento de que las células cancerosas presentaban una organización genómica compleja ha estado presente en el estudio del cáncer desde principios del siglo XX, no ha sido sino hasta hace relativamente poco tiempo cuando se ha encontrado relación de causalidad entre el fenómeno de la inestabilidad genómica y el cáncer.

Parte de responsabilidad en este retraso la tuvo un descubrimiento de los años ochenta, por otro lado del máximo interés: en la raíz del problema podrían hallarse mutaciones puntuales en genes involucrados en la génesis o supresión del cáncer (oncogenes y genes supresores de tumores). Con la atención puesta en ese foco, pasaron a segundo plano las observaciones realizadas en el campo de la inestabilidad genómica.

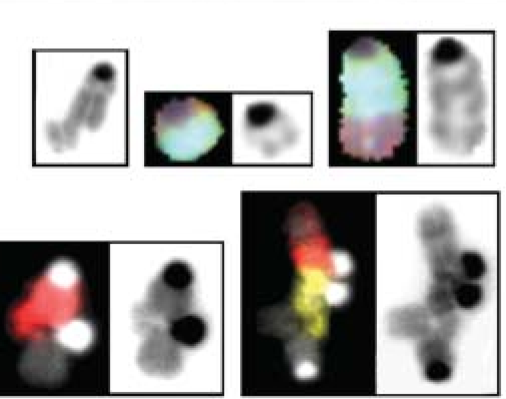
Así transcurrieron los últimos 20 años. Fruto de esos esfuerzos, un estudio, ya clásico, del grupo de Bert Vogelstein, realizado en cáncer de colon demostró que la progresión tumoral dependía de la adquisición progresiva de un número mínimo de mutaciones, mutaciones que tendrían como consecuencia la activación de oncogenes o eliminación de genes supresores de tumores. Sin embargo, dicho modelo difícilmente encajaba con los datos moleculares disponibles. El valor estimado de las tasas de mutación en células humanas resultaba insuficiente para que fuera significativa la probabilidad de desarrollar cualquier tipo de tumor a lo largo de un período equivalente al de una vida humana. Estos y otros desajustes que fueron apareciendo, recondujo buena parte de la investigación hacia el análisis de la maquinaria celular encargada de mantener la estabilidad del material genético.

Tal y como era de prever, los primeros trabajos acerca de la inestabilidad genómica corroboraron que se trataba de un fenómeno harto complejo, que no cabía atribuir a una sola etiología. En cualquier caso, el factor desencadenante principal posiblemente lo constituya la existencia de fallos en los mecanismos de reparación del ADN. El papel jerárquico que ejerce el ADN en la célula no exime a esta molécula de estar expuesta a todo tipo de lesiones. Lesiones, que no sólo se presentan como consecuencia de agresiones directas (exposición a radiaciones de alta energía o a componentes químicos mutagénicos), sino que se originan también por la interacción entre el ADN y subproductos del propio metabolismo celular, e incluso de manera programada y controlada (recombinación meiótica o generación de diversidad inmunitaria).

En este marco, las alteraciones operadas en el genoma se pueden acumular en la célula debido a dos procesos fundamentales, íntimamente relacionados: la incapacidad para detectar las alteraciones, la imposibilidad para repararlas o ambas. Importa resaltar, a este respecto, que muchas de las respuestas en el campo del análisis de la reparación del ADN se han obtenido a partir del estudio de organismos eucariotas unicelulares, tales como las levaduras.

En efecto, el problema de la reparación del ADN es un problema *ab initio*. Además, la mayoría de los componentes moleculares que participan en los mecanismos responsables de mantener la integridad del ADN persisten ("están conservados") en todos los seres vivos. Expuesto de una manera esquemática, las proteínas que controlan los puntos de control ("checkpoint") del ciclo celular son las encargadas de reconocer la presencia de daño en el ADN y de retrasar la proliferación celular hasta certificar que el daño se ha reparado o, por contra, de desencadenar el suicidio celular en el caso de que el daño resulte irreparable. La maquinaria de reparación, por sí misma, se encarga de restañar las lesiones detectadas. Ello no obsta para que Nbs1 y otras proteínas intervengan en el proceso de reconocimiento de la lesión, en su procesado y reparación.

La relación de causalidad entre la inestabilidad genómica y el cáncer quedó al descubierto al observarse el origen de enfermedades tales como la ataxia telangiectasia, el síndrome de Nijmegen o el síndrome de Bloom, que se caracterizan por infertilidad, inmunodeficiencia, desórdenes neurodegenerativos y rápida aparición de tumores en las personas que los padecen. Tales síndromes humanos se originan como consecuencia de mutaciones en alguna de las proteínas que participan en los "puntos de control" o en la reparación del ADN (ATM, Nbs1 y Blm, respectivamente).



Las técnicas de hibridación in situ del ADN con sondas fluorescentes (FISH) permiten identificar en detalle los cromosomas e incluso los genes que contienen aberraciones. La figura superior muestra el cariotipo presentado por células encontradas en un linfoma de ratón. En este caso, el cariotipo revelaba una translocación recíproca entre el cromosoma 6 (azul) *y el cromosoma 14* (rojo) *a la altura del locus del TCR alpha* (amarillo). *Abajo, se exponen alteraciones típicas asociadas a inestabilidad genómica. De izquierda a derecha: ruptura de cromátida, translocaciones recíprocas entre el cromosoma 4 (*verde*) y el cromosoma 7 (*morado*), translocación cuadrirradial y un caso de reorganización compleja*

Reforzando la idea de causalidad, la generación de modelos animales, principalmente de ratones, deficientes en alguna de estas proteínas ha mostrado sintomatologías similares a las humanas. Merced a ello se ha podido abordar el estudio en profundidad del papel de dichas proteínas, con el descubrimiento consiguiente de nuevos genes cuya alteración podría estar involucrada en la etiología de enfermedades asociadas a la inestabilidad genómica.

Derivadas también de las observaciones realizadas en modelos animales, se están explorando otras causas de la inestabilidad genómica. Mencionaremos, por botón de muestra, el acortamiento de los telómeros hasta una longitud crítica o la división no equilibrada de los cromosomas durante la mitosis.

Se repite aquí un episodio frecuente de la historia del pensamiento científico. La incongruencia existente entre el modelo original, basado en el desequilibrio proliferativo generado por la presencia de oncogenes o la ausencia de genes supresores de tumores, y los datos hasta ahora comentados ha culminado en la reciente propuesta de otro modelo de progresión tumoral, que, mayoritariamente aceptado, refina el anterior.

El nuevo modelo establece que uno de los primeros pasos del proceso tumoral podría afectar a la propia tasa de mutación, confiriendo a las células pretumorales un fenotipo "mutador" y favoreciendo la acumulación de nuevas mutaciones. Se trata de una hipótesis que viene refrendada por la alta incidencia de tumores que presentan tanto síndromes humanos como modelos animales cuyo problema raíz reside en una alta tasa de inestabilidad genómica.

No obstante, aún carece de respuesta formal la pregunta de si la inestabilidad genómica precede a los procesos tumorales o simplemente es consecuencia del ciclo anormal de división presentado por las células cancerosas. El debate sigue abierto. Una vez comprendamos las causas de la inestabilidad genómica, habremos construido otro campamento base para atentar contra la soberanía del cáncer. Quién sabe hasta dónde avanzaremos esta vez.

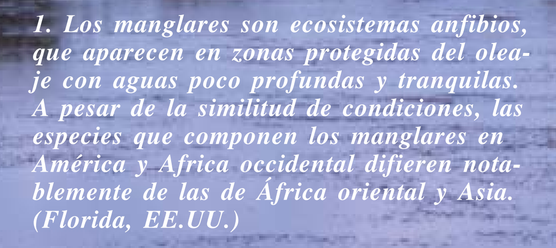
OSCAR FERNÁNDEZ CAPETILLO
Instituto Nacional de Cáncer,
Bethesda

DE CERCA

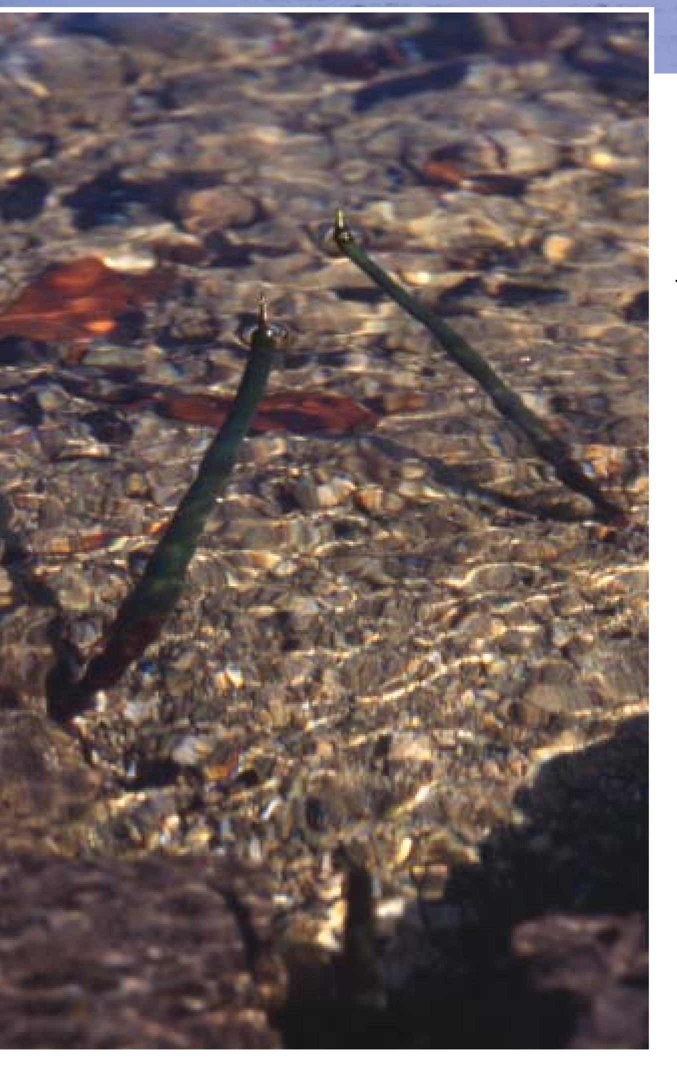
Texto y fotos: Daniel Arbós y Nagore Sampedro



Manglares: los bosques inundados



1. Los manglares son ecosistemas anfibios, que aparecen en zonas protegidas del oleaje con aguas poco profundas y tranquilas. A pesar de la similitud de condiciones, las especies que componen los manglares en América y Africa occidental difieren notablemente de las de África oriental y Asia. (Florida, EE.UU.)



2. Algunos mangles, como Rhizophora mangle *son vivíparos. La semilla empieza a desarrollarse convirtiéndose en plántula antes de desprenderse del árbol; tras caer es dispersada por el agua hasta que encuentra un lugar donde poder fijarse y formar un nuevo individuo. (Florida, EE.UU.)*

En estuarios, lagunas litorales, bahías o deltas fluviales, zonas todas ellas de transición entre el mar y la tierra, pueden aparecer manglares. Estos ecosistemas, dominados por los mangles, ocupan áreas donde el agua de mar confluye con la del continente procedente de los ríos o de escorrentía. Su distribución se encuentra limitada por las bajas temperaturas. De ahí su confinamiento a la franja tropical y subtropical.

Bajo el nombre de mangles se engloban plantas leñosas de familias muy diversas que comparten en común la capacidad de prosperar en tales ambientes adversos. Adaptaciones estructurales (raíces extremadamente desarrolladas), fisiológicas (la eliminación del exceso de sal por las hojas) y reproductivas (el viviparismo) les permiten hacer frente a la inundación, la salinidad y la inestabilidad del substrato.

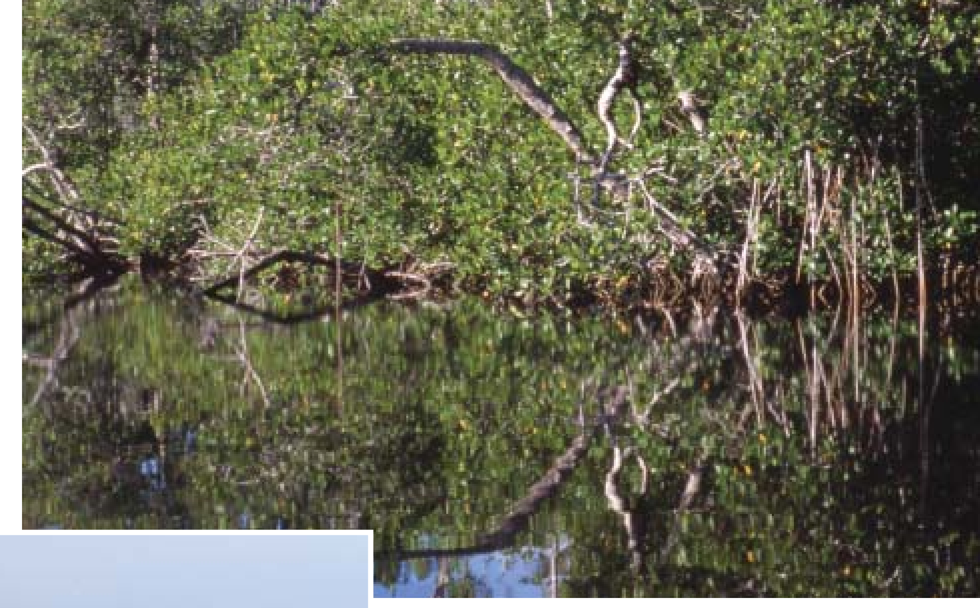
Los manglares albergan una valiosa riqueza ecológica. La abundancia de nutrientes, las condiciones estables y la protección que dan las raíces hacen de estos ecosistemas el entorno perfecto para el desarrollo de muchos invertebrados y peces. Sirven también de substrato para animales sésiles y filtradores. Así, se convierten en espacios de gran interés económico por su enorme producción de crustáceos o moluscos apreciados en gastronomía, como los langostinos (*Penaeus*) y las ostras (*Crassostrea*).

NAGORE SAMPEDRO (*Fotografías*)



3. En el continente americano las especies más comunes son el mangle rojo (Rhizophora mangle)*, el mangle negro* (Avicennia germinans) *y el mangle blanco* (Laguncularia racemosa)*. Su distribución dentro del manglar viene determinada por el grado de inundación, la salinidad y la composición del suelo. El mangle rojo, el más tolerante a la inundación, suele ubicarse más próximo al mar. (Yucatán, México.) Foto: Laia Andreu*





4. El mangle rojo (Rhizophora mangle) *presenta un sistema radicular muy particular. Sus zancos son poderosas raíces aéreas que facilitan el anclaje en terrenos inestables y el intercambio gaseoso cuando el suelo se halla inundado. Asimismo, evitan que la parte aérea entre en contacto directo con el agua. (Florida, EE.UU.) (arriba y derecha)*

5. Elevada biodiversidad la de estos ecosistemas. La cantidad de algas y invertebrados que crecen en los manglares hacen las delicias de miles de aves que se alimentan, nidifican y encuentran allí refugio. Son un buen ejemplo de ello el pelícano pardo (Pelecanus occidentalis)*, el ibis rojo* (Eudocimus ruber)*, la garceta tricolor* (Egretta tricolor) *o el flamenco* (Phoenicopterus ruber)*. (Florida, EE.UU.)*

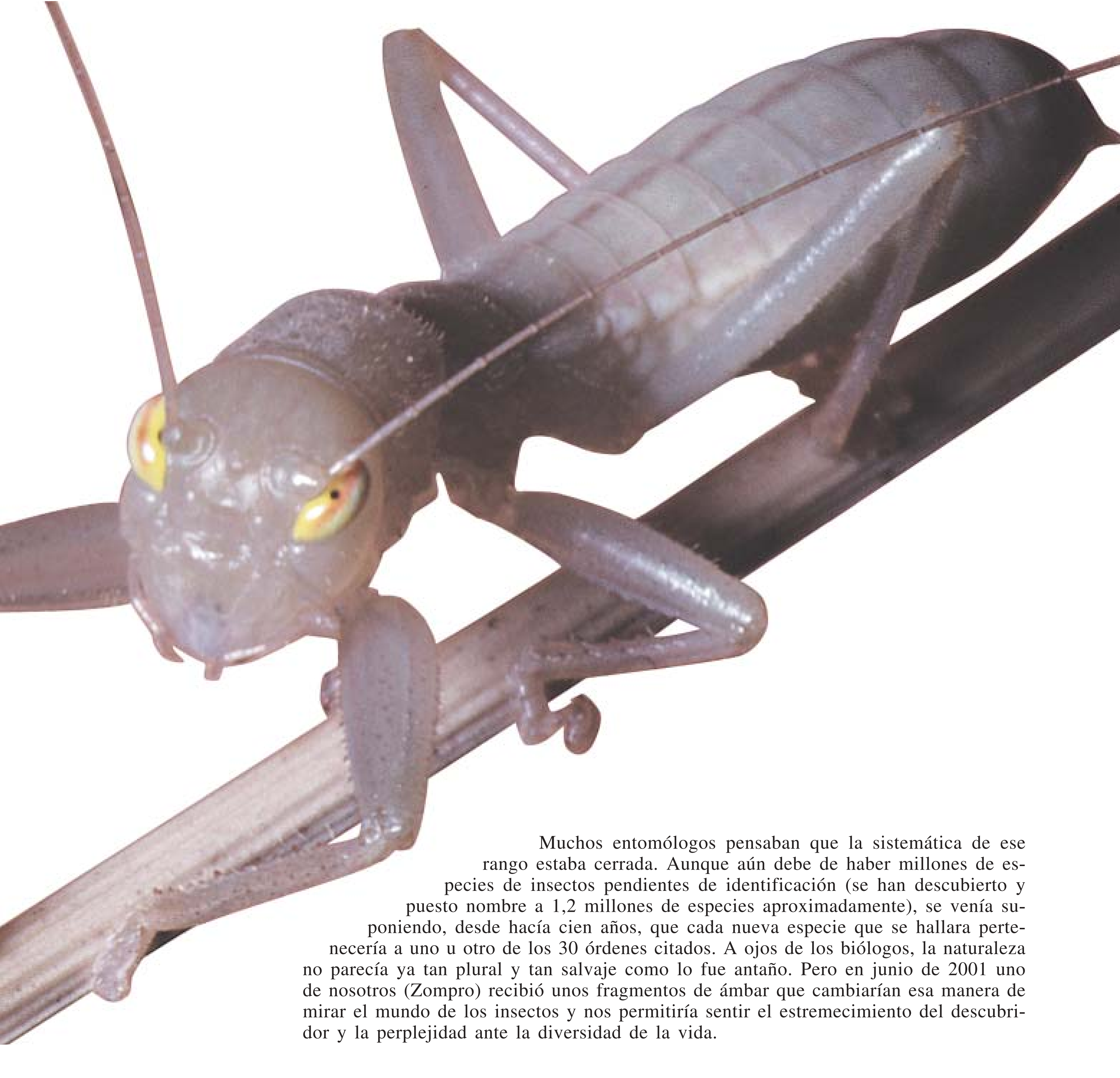
Gladiadores: un nuevo orden de insectos

El misterio encerrado en un trozo de ámbar del Báltico se resuelve en una montaña del desierto de Namibia con un descubrimiento que ha revolucionado la sistemática de los insectos

Joachim Adis, Oliver Zompro, Esther Moobolah-Goagoses y Eugène Marais



Imagínese que es la primera persona del mundo que ve una mariposa, un escarabajo o una avispa. Imagínese la sensación de admiración ante un universo tan amplio que contiene no sólo especies, géneros o familias por descubrir, sino también órdenes enteros de seres pendientes de que se les ponga un nombre. Carl Linnaeus debió haber sentido esa sensación hace 250 años cuando acomodaba las plantas y animales recién descubiertos en el sistema taxonómico que acababa de inventar. Una emoción pareja debió de experimentar E. M. Walker, quien en 1914 describió los grilloblátidos (Grylloblattodea), elevando a 30 el número de órdenes en la clase de los insectos.



Muchos entomólogos pensaban que la sistemática de ese rango estaba cerrada. Aunque aún debe de haber millones de especies de insectos pendientes de identificación (se han descubierto y puesto nombre a 1,2 millones de especies aproximadamente), se venía suponiendo, desde hacía cien años, que cada nueva especie que se hallara pertenecería a uno u otro de los 30 órdenes citados. A ojos de los biólogos, la naturaleza no parecía ya tan plural y tan salvaje como lo fue antaño. Pero en junio de 2001 uno de nosotros (Zompro) recibió unos fragmentos de ámbar que cambiarían esa manera de mirar el mundo de los insectos y nos permitiría sentir el estremecimiento del descubridor y la perplejidad ante la diversidad de la vida.

Congelados en el tiempo

Los trozos de ámbar, pertenecientes a las colecciones de la Universidad de Hamburgo, procedían de excavaciones en el Báltico. Cuando la savia del árbol se solidificó hace unos 45 millones de años, quedaron en ella atrapadas algunas larvas de insecto que parecían absolutamente diferentes de todo lo que Zompro había visto antes.

Un mes más tarde, Zompro, que preparaba la tesis doctoral en el Instituto Max Planck de Limnología en Plön, se hallaba de visita en el Museo de Historia Natural de Londres, cuando la conservadora Judith A. Marshall le mostró un insecto disecado que había sido capturado en Tanzania en 1950. Estaba claro que se trataba del exoesqueleto de un macho adulto, pero nadie había sido capaz de identificar qué tipo de insecto había sido en su día. Zompro tomó algunas fotografías y volvió con ellas a Alemania.

Unos días más tarde, llegó por correo otro fragmento de ámbar. Pertenecía a una colección privada y contenía el fósil de un macho adulto indeterminado. Cuando Zompro lo examinó al microscopio, se sorprendió de su parecido con el exoesqueleto que acababa de ver en Londres.

THOMAS KUJAWSKI ASA-*Multimedia*





1. EL AMBAR FOSIL preservó este macho adulto de insecto durante millones de años. Su hallazgo se convirtió en pieza crucial para el descubrimiento del nuevo orden Mantophasmatodea. Los insectos han evolucionado: los gladiadores de hoy día tienen unas patas anteriores más delgadas y la cabeza es menos triangular y más redondeada.

En ese momento Zompro se dio cuenta de que se hallaba ante algo interesante. Le mostró el nuevo fósil del ámbar al supervisor de su tesis (Adis), quien le sugirió que explorase las colecciones de varios museos europeos, por si albergaban otros especímenes de ese insecto sin identificar. En ninguno de cuantos recorrió halló ejemplares que se ajustaran a lo buscado. Hasta que en el Museo de Historia Natural de Berlín tropezó con el tesoro esperado: un pequeño frasco lleno de alcohol que contenía el cuerpo embalsamado de una hembra adulta de un insecto que tenía todo el aspecto del misterioso animal del ámbar.

Cuando Zompro y Adis estudiaron cuidadosamente esos dos ejemplares adicionales, uno prehistórico y el otro capturado en los suelos de Namibia hacía casi un siglo, su excitación aumentó. A primera vista, los animales, con sus poderosas patas posteriores, parecían saltamontes, pero no tenían alas, que sí poseen la mayoría de los saltamontes. Sus patas anteriores estaban tachonadas de espinas, como las que usan las mantis religiosas para capturar y sujetar a las presas que se comen vivas. Pero la cabeza y las patas posteriores de aquellos desconcertantes insectos eran claramente diferentes de las de una mantis. Vistos por encima mostraban un aspecto muy parecido al de los insectos palo. Sin embargo, su segundo segmento corporal era demasiado pequeño para corresponder a un insecto palo. Además, sus intestinos contenían fragmentos de otros insectos, señal evidente de un régimen carnívoro.

Se trataba de diferencias importantes. Nuestros colaboradores Klaus-Dieter Klass y Niels P. Kristensen hallaron otras estructuras novedosas dentro del cuerpo de los insectos. Con tantas diferencias fundamentales en la forma del cuerpo y en su dieta, apenas tardamos unas horas en concluir con certeza que esos organismos no se podían inscribir en ninguno de los órdenes existentes. Teníamos que crear una categoría para ellos, una categoría equivalente a la de las moscas, los escarabajos o las termitas.

Establecimos para ellos el nombre científico Mantophasmatodea, habida cuenta de que los insectos parecían el curioso resultado de cruzar una mantis (orden Mantodea) y un insecto palo (orden Phasmatodea). Pero entre nosotros comenzamos a llamarles “gladiadores”: ofrecen un aspecto temible y se cubren con una suerte de coraza en el estadio de ninfa.

Aunque sospechamos que los gladiadores comparten un ancestro común con los mántidos y con los insectos palo, aún queda trabajo por hacer antes de determinar su posición exacta dentro del árbol evolutivo de los insectos. Los análisis de ADN encaminados a este fin se hallaban en curso de realización hace unos pocos meses.

Los autores

JOACHIM ADIS, OLIVER ZOMPRO, ESTHER MOOBOLAH-GOAGOSES y EUGÈNE MARAIS colaboraron en el descubrimiento del orden Mantophasmatodea. Adis es profesor de investigación en ecología tropical del Instituto Max Planck de Limnología en Plön. Tarea que comparte con la enseñanza en la Universidad de Kiel y en diversos centros superiores del Brasil. Desde 1975 su trabajo se ha centrado en la ecología y estrategias de supervivencia de milpiés, arañas e insectos en los humedales amazónicos. Zompro prepara la tesis de doctorado con Adis. Desde 1980 ha criado más de 130 especies de insectos palo e insectos hoja. Se ha especializado en la evolución y ecología del orden de insectos Phasmatodea. Moobolah-Goagoses es conservadora jefe del Museo Nacional de Namibia en Windhoek, donde presta también sus servicios Marais.

Caza mayor en el desierto

La primera cuestión que nos interesaba resolver era si nos hallábamos ante un orden con representantes vivos o se trataba, por el contrario, de un grupo extinto. Sólo sabíamos que el gladiador de Tanzania había sido colectado hacía medio siglo. Adis envió por correo electrónico fotografías de los insectos a colegas de todo el mundo, pidiéndoles que miraran si tenían insectos similares entre sus colecciones.


THOMAS KUJAWSKI *ASA-Multimedia*

HA NACIDO UN ORDEN

GLADIADORES

LA ANATOMIA DE LOS GLADIADORES comparte muchas características con la de los saltamontes, insectos palo y mantis. Pero los gladiadores difieren de ellos y del resto de los órdenes en muchos aspectos cruciales. En abril de 2002 se hizo oficial la existencia de un nuevo orden, Mantophasmatodea. Consta, por lo menos, de tres especies actuales y dos extintas.

ORDENES DE INSECTOS

Nombre común	Nombre científico
Moscas	*Diptera*
Estrepsípteros	*Strepsiptera*
Moscas escorpión	*Mecoptera*
Pulgas	*Siphonaptera*
Polillas, mariposas	*Lepidoptera*
Frigáneas	*Trichoptera*
Hormigas, avispas, abejas	*Hymenoptera*
Escarabajos	*Coleoptera*
Crisopas, hormigas león	*Neuroptera*
Megalópteros	*Megaloptera*
Rafidiópteros	*Raphidioptera*
Piojos de los libros	*Psocoptera*
Piojos	*Phthiraptera*
Chinches	*Heteroptera*
Trips	*Thysanoptera*
Perlas	*Plecoptera*
Embiópteros	*Embioptera*
Zorápteros	*Zoraptera*
Cucarachas	*Blattodea*
Mántidos	*Mantodea*
Gladiadores	***Mantophasmatodea***
Termitas	*Isoptera*
Tijeretas	*Dermaptera*
Grilloblatodeos	*Grylloblattodea*
Insectos palo	*Phasmatodea*
Saltamontes, grillos	*Orthoptera*
Libélulas	*Odonata*
Efímeras	*Ephemeroptera*
Pececillos de plata	*Zygentoma*
Arqueognatos	*Archaeognatha*
Pulgones, cigarras	*Homoptera*

VISTA LATERAL

UÑAS MORTALES
Las espinas de las patas delanteras, como las de una mantis, sujetan las presas mientras son comidas vivas

PATAS SALTADORAS
No tan desarrolladas como las de los saltamontes



DEVORADORAS DE ANIMALES
Las poderosas mandíbulas evidencian una forma de vida carnívora. Muchos saltamontes e insectos palo son vegetarianos

VISTA SUPERIOR



APTEROS
Los gladiadores carecen de alas; muchas mantis y saltamontes tienen cuatro

CUERPO LARGO Y ESTRECHO
Como un insecto palo

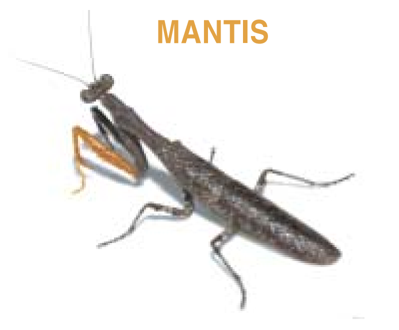
TORAX MODERADO
En los insectos palo el segundo segmento torácico es más largo —normalmente mucho más largo— que el primero, y el tercer segmento está unido al abdomen

TARSO GANCHUDO
Según parece, exclusivo de los gladiadores

INSECTO PALO



MANTIS



SALTAMONTES



THOMAS KUJAWSKI *ASA-Multimedia* (*arriba y centro*); JOHN MOORE (*abajo*)



2. LOS GLADIADORES SE ACORAZAN en su juventud. Las ninfas toman el color de las rocas del desierto, para protegerse de los depredadores y del sol.

En la Universidad de Leeds aparecieron un gladiador adulto y dos larvas. Habían sido colectados en el Macizo de Brandberg de Namibia en algún momento entre 1998 y 2000. Además, uno de nosotros (Marais) encontró dos ejemplares que encajaban con la descripción. El propio Marais había colectado uno de ellos en Namibia en 1990; el otro había sido capturado por un estudiante de este país en 2001.

Aprovechando una estancia de Marais en Alemania, junto a Zompro y Adis, se proyectó una expedición a Namibia para buscar gladiadores vivos. El último día de febrero de 2002, diez científicos de cinco países se internaban en el desierto tropical de Namibia. El grupo se dirigió al Brandberg, un macizo circular que, como un enorme promontorio de granito, se eleva 1800 metros por encima de una llanura estéril en la provincia de Erongo. Los indígenas la denominan Dâures: la Montaña Ardiente. Remoto y protegido, el macizo de Brandberg es el hogar único de una serie de animales endémicos.

La búsqueda comenzó a principios de marzo sobre un altiplano rocoso rodeado de peñascos imponentes. Zompro y el resto de los entomólogos se dedicaron a explorar. John Irish, un taxónomo de Namibia, batía arbustos herbáceos con varas para recoger los insectos que caían. Pocas horas después de iniciada la búsqueda, Irish se inclinó y escudriñó cuidadosamente algo que se le quedó en la mano.

"Creo que tengo algo para ti, Oliver", dijo. En la palma de su mano había una pequeña larva, un gladiador en la segunda fase de su ciclo biológico. Aquel atardecer otro miembro del grupo halló cuatro larvas más. A duras penas podíamos disimular nuestra excitación. Inadvertida para la ciencia, esta cadena de vida había permanecido intacta ¡más de 45 millones de años!

Aquella noche, mientras los investigadores se retiraban a descansar, tras una gratificante contemplación de la Cruz del Sur en medio de un maravilloso cielo estrellado, merodeó sigiloso un leopardo por el campamento. Pero al grupo sólo le preocupaban las preguntas aún sin respuesta sobre los gladiadores. ¿Qué comen? ¿Dónde obtienen agua? ¿Cómo sobrevivían a inundaciones repentinas y a oscilaciones de temperatura diarias de 25 grados Celsius? Para contestar, necesitábamos observar su comportamiento en todas las fases de su vida.

El grupo quería buscar en otras partes del macizo —y montañas cercanas—, pero la climatología conspiró contra un descenso rápido. Temperaturas por encima de los 44 ºC hicieron muy arduo el descenso de las escarpadas laderas. Los aguaceros periódicos convirtieron arroyos casi secos en peligrosos cursos de agua. A modo de compensación, el agua transformó un paisaje de amarillos, grises y marrones en una verde explosión de vegetación.

Hacia mediados de marzo, Zompro y sus colegas se internaron en las montañas vecinas. Una caza nocturna permitió capturar otra especie de gladiador; habíamos identificado ya cuatro especies distintas pertenecientes al nuevo orden. Y al día siguiente, Zompro pudo realizar las primeras observaciones sobre el comportamiento de los insectos en el campo.

La vida de un gladiador

Capturados vivos una docena de gladiadores, nos los llevamos a Alemania, donde hemos venido estudiando su biología. Algo hemos aprendido del nuevo tipo de insecto y tenemos confianza en el rápido progreso de las investigaciones.

En las laderas de las montañas, durante el día observamos a los gladiadores escondidos en las matas de hierba y en las grietas de las rocas, mientras que a la caída de la noche salían a cazar presas.

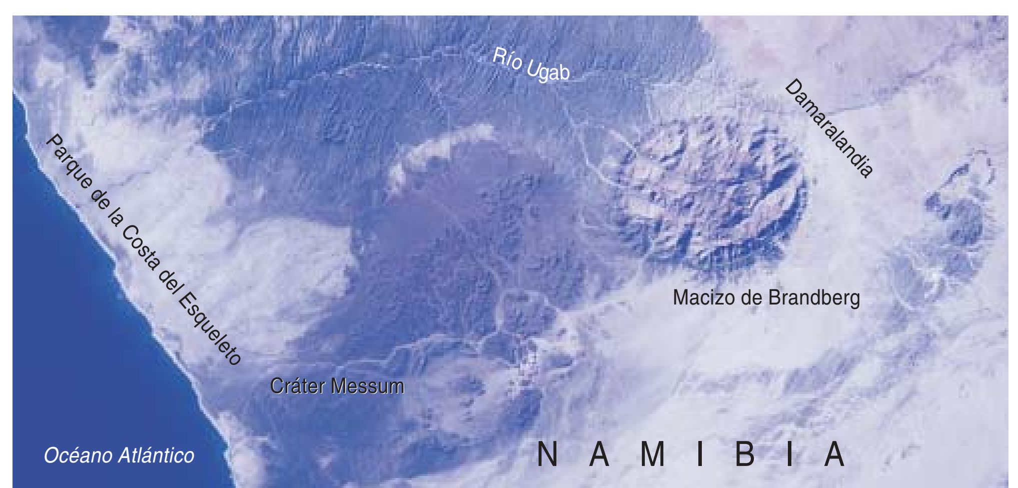
Los gladiadores, carnívoros, se alimentan de insectos de diversos tipos, algunos de su misma talla. En

THOMAS KUJAWSKI *ASA-Multimedia*

3. PARA PERPETUAR la especie, el gladiador macho monta sobre la hembra durante la cópula. El macho de la especie de gladiador *Mantophasma zephyra* puede escoger hembras de dos colores distintos: verde y marrón claro.







4. EQUIPO EXPEDICIONARIO en busca de gladiadores. Con la ayuda de Marais, un equipo de 10 entomólogos viajó en camión y helicóptero por el vasto y desolado desierto del Namib. Empezaron su búsqueda en el macizo de Brandberg, una montaña solitaria (*izquierda*) que es la más alta de Namibia. Allí, y en las vecinas montañas de Damaralandia, Zompro y los demás descubrieron dos especies vivas de gladiadores.

THOMAS KUJAWSKI *ASA-Multimedia* (*fotografías*); LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE (*imagen de satélite*)

el campo los vimos comiendo polillas, pececillos de plata y cucarachas. En cautividad prefieren moscas y grillos vivos. Los gusanos de la harina muertos también satisfacen sus gustos.

Utilizan sus poderosas patas anteriores para luchar con las presas hasta inmovilizarlas. Para asir presas mayores pueden usar también sus patas intermedias (los saltamontes carnívoros se sirven de una técnica tetrapódica similar para cazar). Matan con poderosas picaduras en el cuello las moscas grandes. Las devoran luego, empezando por la cabeza. Se comen el cuerpo entero, excepto las alas y las patas. Hemos visto jóvenes gladiadores heridos que se convierten en víctimas de canibalismo.

La larva crece muy deprisa, mudando su piel varias veces a medida que se produce la maduración hacia el estadio adulto. Parece como si hubieran adaptado todo su ciclo biológico a aprovechar la corta estación de lluvias, que en el macizo de Brandberg dura sólo unos pocos meses. Todavía no sabemos cómo y cuándo pone sus huevos en el campo la hembra de gladiador.

El inesperado descubrimiento de un nuevo orden en la clase de los insectos ha dejado perplejos a numerosos entomólogos. Algunos han empezado a revisar sus colecciones a la búsqueda de nuevos ejemplares. Se han hallado 29 de ellos en museos de Sudáfrica, país en cuya provincia de El Cabo Occidental menudean los gladiadores.

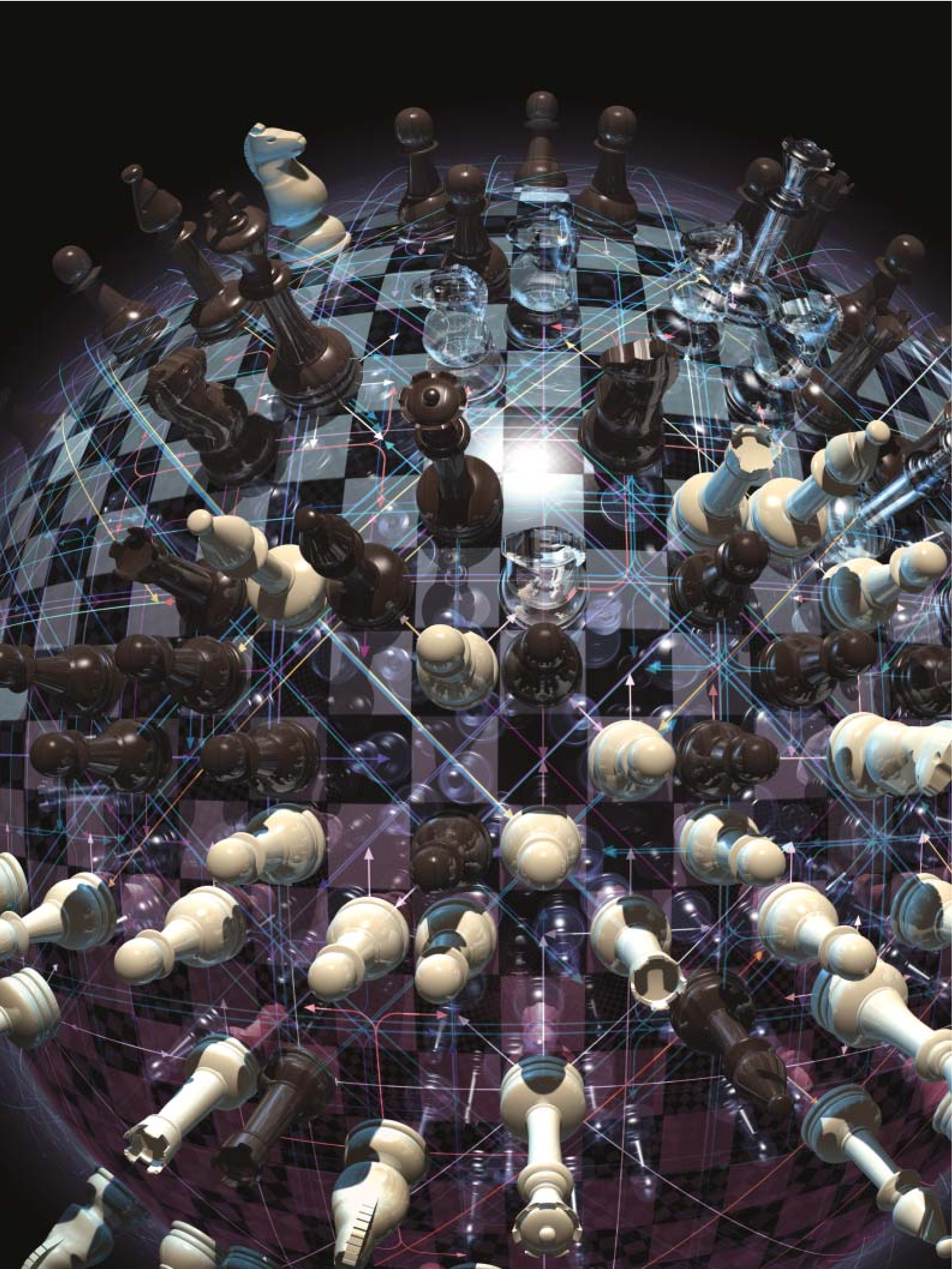
Otros grupos de diversos centros académicos se han sumado a la investigación sobre el comportamiento, ciclo biológico y reproducción de los gladiadores. Romano Dallai, de la Universidad de Siena, estudia la morfología y estructura del esperma del insecto. Los equipos coordinados por Michael F. Whiting, de la Universidad Brigham Young, y por Roger K. Butlin, de la Universidad de Leeds, abordan el análisis del ADN de los gladiadores. Es de esperar, pues, que pronto contaremos con una visión más clara sobre el lugar que ocupan los Mantophasmatodea dentro de las ramas de la clase de los insectos, la parte más extensa y ramificada del árbol de la vida.

Pero el hecho de que la prueba real de este nuevo orden se hallaba en los museos, donde pasó inadvertida décadas hasta que un encuentro fortuito (y un estudiante avispado) pusieron juntas las piezas, nos da que pensar. ¿Hay otros ordenes de insectos aún por descubrir? Para los amantes de los insectos, la naturaleza repentinamente nos parece un poco más extensa y salvaje de lo que creíamos.

Bibliografía complementaria

MANTOPHASMATODEA: A NEW INSECT ORDER WITH EXTANT MEMBERS IN THE AFROTROPICS. Klaus-Dieter Klass, Oliver Zompro, Niels P. Kristensen y Joachim Adis en *Science*, vol. 296, págs. 1456-1459; 24 de mayo de 2002.

A REVIEW OF THE ORDER MANTOPHASMATODEA (INSECTA). O. Zompro, J. Adis y W. Weitschat en *Zoologischer Anzeiger*, vol. 241 (en prensa).





Reglas para un mundo cuántico complejo

Un nuevo y excitante campo de investigaciones fundamentales combina la ciencia de la información y la mecánica cuántica

Michael A. Nielsen

En los últimos decenios se ha comprendido que las reglas sencillas pueden dar lugar a comportamientos muy complejos. Un buen ejemplo es el ajedrez. Imaginemos que el lector es un jugador de ajedrez experimentado. Le presentan a alguien que afirma conocer las reglas del juego. Juega con él unas cuantas partidas y percibe que, en efecto, las conoce, pero no tiene ni idea de cómo se saca adelante una partida. Realiza movimientos absurdos, sacrifica la reina por un peón y pierde una torre sin razón alguna. No *entiende* de verdad el ajedrez: ignora los principios y la heurística de alto nivel que a cualquier jugador experto le son familiares. Estos principios son propiedades colectivas, o emergentes, del ajedrez, características que no resultan evidentes de inmediato a partir de las reglas, sino que surgen de las interacciones entre las piezas del tablero.

El grado de comprensión que en estos momentos los científicos tienen de la mecánica cuántica es como el de un principiante del ajedrez que aprendiese despacio. Conocemos las reglas desde hace más de 70 años y sabemos algunos movimientos clave que funcionan bien en ciertas situaciones especiales, pero vamos aprendiendo sólo poco a poco los principios de alto nivel necesarios para jugar una partida de competición.

El descubrimiento de estos principios es el objetivo de la ciencia de la información cuántica, un campo fundamental que va desbrozándose gracias a una manera nueva de comprender el mundo. Muchos artículos acerca de la ciencia de la información cuántica se centran en las aplicaciones técnicas: algunos grupos de investigación "teletransportan" estados cuánticos de una localización a otra; otros se valen de estados cuánticos para crear claves criptográficas que no puedan ser espiadas; los científicos de la información diseñan algoritmos para hipotéticos computadores mecanocuánticos, mucho más rápidos que los mejores algoritmos de los computadores ordinarios, o clásicos.

Estos desarrollos técnicos son fascinantes, pero obscurecen su propia naturaleza; no son más que productos secundarios de investigaciones que se centran en nuevas y profundas cuestiones científicas. Las aplicaciones, el teletransporte cuántico, digamos, desempeñan un papel similar al de las máquinas de vapor y otros mecanismos que alentaron el desarrollo de la termodinámica en los siglos XVIII y XIX.

La termodinámica nació de hondas cuestiones básicas relativas a la interrelación de la energía, el calor y la temperatura, las transformaciones de estas magnitudes entre sí en los procesos físicos y el papel fundamental de la entropía. De manera semejante, quienes estudian la información cuántica están sondeando la relación entre las unidades de información clásica y cuántica, las nuevas maneras en que se puede procesar la información cuántica y la importancia crucial de una característica cuántica conocida como entrelazamiento, consistente en la existencia de peculiares conexiones entre diferentes objetos.

Los divulgadores suelen presentar el entrelazamiento como una propiedad de todo o nada: o

SLIM FILMS

las partículas cuánticas están entrelazadas, o no. La ciencia de la información cuántica ha descubierto que el entrelazamiento es, como la energía, un recurso cuantificable que posibilita tareas de procesado de información: algunos sistemas tienen un poco de entrelazamiento, otros mucho. Cuanto mayor sea el entrelazamiento disponible, más valdrá un sistema para el procesado cuántico de información. Además, se han empezado a desarrollar potentes leyes cuantitativas del entrelazamiento (análogas a las leyes de la termodinámica que rigen la energía); nos proporcionan un conjunto de principios de alto nivel para la comprensión del entrelazamiento y describen cómo podemos valernos de éste para el procesado de la información.

La ciencia de la información cuántica es lo bastante nueva como para que se esté aún intentando aprehender su auténtica naturaleza y se discrepe acerca de qué cuestiones son en ella las centrales. Este artículo presenta mi punto de vista personal: que el objetivo central de la ciencia de la información cuántica es desarrollar principios generales, leyes del entrelazamiento, que nos permitan interpretar la complejidad en los sistemas cuánticos.

Complejidad y cuantos

Numerosos estudios sobre la complejidad se centran en sistemas tales como la meteorología o las montañas de arena, que se describen más por medio de la física clásica que de la cuántica. Este punto de vista es natural. Los sistemas complejos suelen ser macroscópicos, con muchas partes constituyentes, y la mayoría pierden su naturaleza cuántica a medida que aumentan de tamaño. Esta transición de cuántico a clásico ocurre debido a que, en general, los grandes sistemas cuánticos interaccionan fuertemente con su entorno y sufren un proceso de decoherencia que destruye las propiedades cuánticas del sistema [*véase* "100 Años de misterios cuánticos," por Max Tegmark y John A. Wheeler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2001].

Como ejemplo de decoherencia, pensemos en el famoso gato de Erwin Schrödinger dentro de su caja. En principio, el gato acaba en un extraño estado cuántico, a medio camino entre vivo y muerto; no tiene sentido describirlo de una manera o de la otra. Sin embargo, en un experimento real, el gato interacciona con la caja mediante el intercambio de luz, calor y sonido; la caja interacciona de manera similar con el resto del mundo. En nanosegundos, estos procesos destruyen los delicados estados cuánticos del interior de la caja y los sustituyen con estados describibles, en buena aproximación, por las leyes de la física clásica. En el interior, el gato realmente está o vivo o muerto, no en algún estado misterioso, un estado no clásico, que combine ambas condiciones.

La clave para que un sistema complejo presente un comportamiento verdaderamente cuántico consiste en aislar muy bien el sistema del resto del mundo, de forma que se evite la decoherencia y se preserven los frágiles estados cuánticos. Es, hasta cierto punto, sencillo lograr ese aislamiento en sistemas pequeños, en átomos suspendidos en el vacío dentro de una trampa magnética, digamos, pero cuesta mucho en sistemas de mayor dimensión donde podríamos encontrar un comportamiento complejo. Algunos fenómenos descubiertos de manera accidental en el laboratorio ofrecen ejemplos de sistemas cuánticos grandes bien aislados, entre ellos la superconductividad y el efecto Hall cuántico. Estos fenómenos demuestran que las reglas sencillas de la mecánica cuántica pueden dar lugar a principios emergentes que gobiernan comportamientos complejos.

Resumen/*Información cuántica*

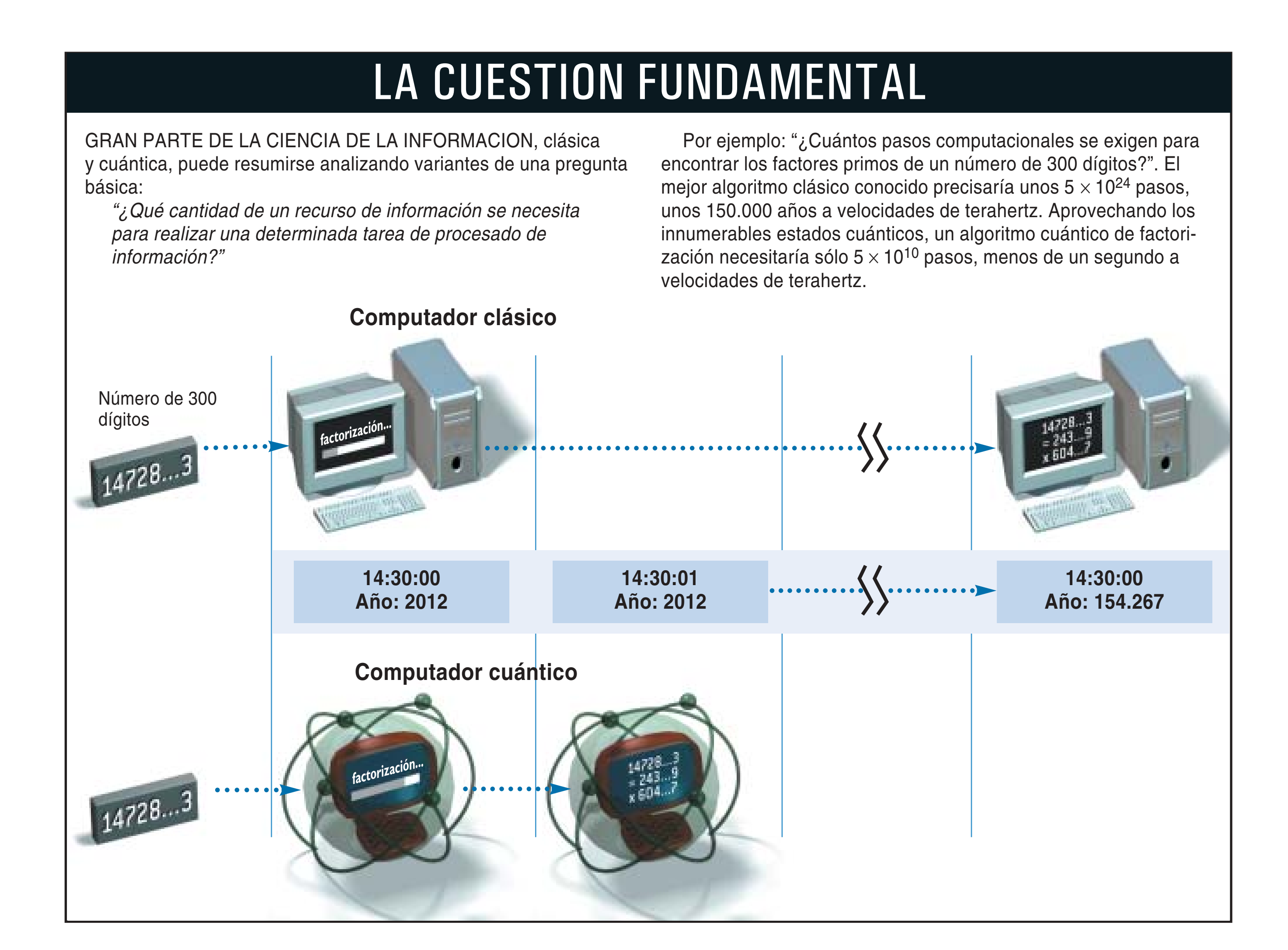
- La información no es pura matemática. Por el contrario, siempre se encarna. En la ciencia de la información tradicional esa materialización se atiene a la física clásica, no a la cuántica. El floreciente campo de la ciencia cuántica de la información coloca a la información en un contexto cuántico.
- El recurso básico de la información clásica es el bit, que siempre es un 0 o un 1. La información cuántica trata de bits cuánticos, o qubits. Los qubits pueden existir en superposiciones, que simultáneamente contienen 0 y 1. Los grupos de qubits pueden "entrelazarse," lo que establece entre ellos correlaciones contrarias a la intuición.
- Los computadores cuánticos que procesan qubits, en particular qubits entrelazados, superarían a los computadores clásicos. El entrelazamiento se comporta como un recurso, similar a la energía, aprovechable para el procesado cuántico de la información.
- El objetivo de la ciencia de la información cuántica es entender los principios generales de alto nivel que gobiernan los sistemas cuánticos complejos, de los que un ordenador cuántico sería un ejemplo. Estos principios se relacionan con las leyes de la mecánica cuántica lo mismo que la heurística que guía a los buenos jugadores de ajedrez se relaciona con las reglas básicas de ese juego.

Recursos y tareas

Intentamos entender los principios de alto nivel que rigen estos raros ejemplos en los que lo cuántico y lo complejo se encuentran tomando, adaptando y extendiendo instrumentos de la teoría clásica de la información. El año pasado, Benjamin Schumacher, del Kenyon College, planteó que los elementos esenciales de la ciencia de la información, tanto clásica como cuántica, se resumían en un procedimiento que abarca tres etapas:

1. Identificar un *recurso físico*. Una cadena de bits es un ejemplo clásico, de sobra conocido. Aunque a menudo se toma a los bits por entidades abstractas —0 y 1—, toda información se codifica inevitablemente mediante objetos físicos reales; por tanto, a una cadena de bits debe considerársela un recurso físico.

2. Identificar una *tarea de procesado de información* que pueda realizarse gracias al recurso físico del paso 1. Un ejemplo clásico es la doble tarea consistente en comprimir la salida de una fuente de información (por ejemplo, el texto de un libro) en una cadena de bits y en descomprimirla más tarde, para



BRYAN CHRISTIE

recuperar la información original de la cadena de bits comprimida.

3. Identificar un *criterio que establezca cuándo ha tenido éxito* la tarea del paso 2. En nuestro ejemplo, el criterio podría ser que la salida de la etapa de decompresión coincida perfectamente con la entrada de la etapa de compresión.

La pregunta fundamental de la ciencia de la información dice, pues: “¿Cuál es la mínima cantidad de recurso físico (1) que necesitamos para realizar la tarea de procesado de información (2) cumpliendo el criterio de éxito (3)?”. Aunque esta cuestión no contiene toda la ciencia de la información, proporciona una vasta panorámica de buena parte de las investigaciones en este campo (*véase el recuadro* “La cuestión fundamental”).

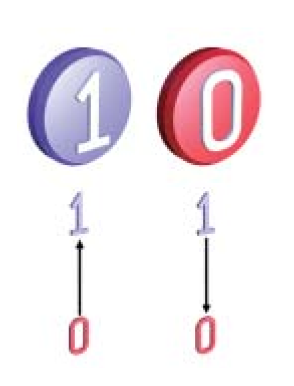
El ejemplo de la compresión de datos corresponde a un problema básico de la ciencia de la información clásica: ¿cuál es el mínimo número de bits necesarios para almacenar la información producida por alguna fuente? Resolvió este problema Claude E. Shannon en sus famosos trabajos de 1948, que fundaron la teoría de la información. Cuantificó el contenido de información producido por una fuente como el mínimo número de bits necesarios para almacenar de manera fiable la salida de la fuente. Su expresión matemática del contenido de información recibe hoy el nombre de entropía de Shannon.

La entropía de Shannon surge como respuesta a una cuestión simple, aunque fundamental, acerca del procesado de la información clásico. Así, quizá no sorprenda que el estudio de las propiedades de la entropía de Shannon haya resultado fructífero en el análisis de procesos mucho más complejos que la compresión de datos. Desempeña, por ejemplo, un papel fundamental en el cálculo de cuánta información puede transmitirse de manera fiable por un canal de comunicaciones con ruido, pero también facilita un mejor conocimiento del juego y el comportamiento del mercado de valores. Una característica general de la ciencia de la información es que las cuestiones acerca de procesos elementales conducen a conceptos unificadores que iluminan procesos más complejos.

En la ciencia de la información cuántica, los tres elementos de la lista de Schumacher adquieren nuevas dimensiones. ¿Qué nuevos recursos físicos ofrece la mecánica cuántica? ¿Qué tareas de procesado de información podemos esperar cumplir? ¿Cuáles son los criterios de éxito apropiados? Ahora, entre los recursos se contarán los estados de superposición, como el idealizado estado vivo y muerto del gato de Schrödinger. Los procesos recurrirán a la manipulación del entrelazamiento (las misteriosas corre-

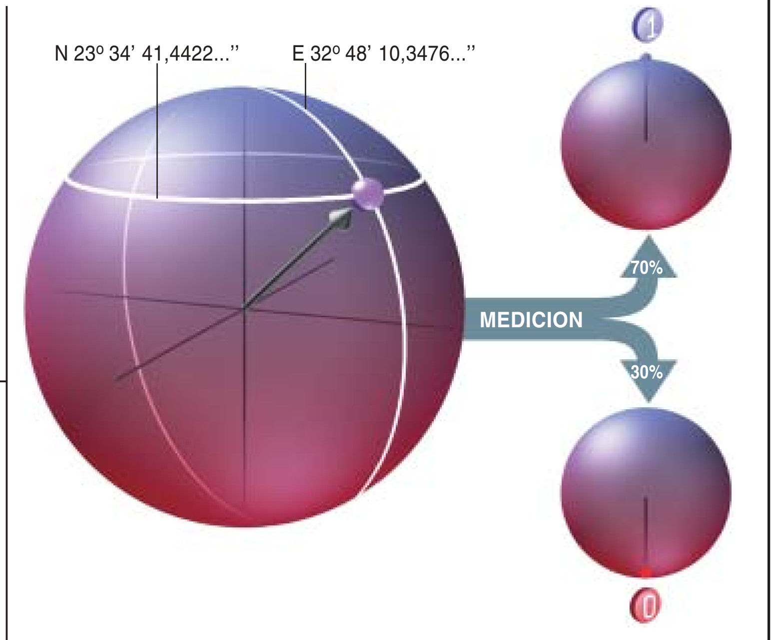
EXPLICACION DE LOS QUBITS

UN BIT puede tener uno de dos estados: 0 o 1. Cabe representarlo por medio de un interruptor transistorizado colocado en “encendido” o en “apagado”; también, de manera más abstracta, por una flecha que apunte hacia arriba o hacia abajo.



UN QUBIT, la versión cuántica de un bit, tiene muchos más estados posibles. Los estados se pueden representar por una flecha que apunte a cualquier punto de una esfera. El polo norte es equivalente al 1; el polo sur, al 0. Los otros puntos son superposiciones cuánticas de 0 y 1.





PODRIA PARECER QUE UN QUBIT contiene una cantidad infinita de información porque sus coordenadas codifican una secuencia infinita de dígitos. Pero la información guardada en un qubit debe extraerse mediante una medición. Cuando se mide el qubit, la mecánica cuántica requiere que el resultado sea siempre un bit ordinario (un 0 o un 1). La probabilidad de cada resultado depende de la “latitud” del qubit.

BRYAN CHRISTIE

laciones cuánticas) entre objetos muy separados. Los criterios de éxito se hacen más sutiles que en el caso clásico, debido a que, para extraer el resultado de una tarea cuántica de procesado de información, hemos de observar, o medir, el sistema. Eso casi inevitablemente lo cambia, arruinando los especiales estados de superposición propios de la física cuántica.

Qubits

La ciencia cuántica de la información empieza por generalizar el recurso fundamental de la información clásica, los bits. Estos bits cuánticos generalizados reciben el nombre de qubits. De la misma manera que los bits son objetos ideales sacados de los principios de la física clásica, los qubits son objetos cuánticos ideales que vienen de los principios de la mecánica cuántica. Los bits se materializan en regiones magnéticas de discos, voltajes de circuitos o señales de grafito hechas con un lápiz sobre papel. El funcionamiento como bits de dichos estados físicos clásicos no depende de los detalles de su realización material. De manera similar, las propiedades de un qubit son independientes de sus representaciones físicas específicas, se trate del espín de un núcleo atómico o de la polarización de un fotón.

Un bit se describe por su estado, 0 o 1. De idéntica forma, un qubit se describe por su estado cuántico. Dos de los posibles estados cuánticos de un qubit corresponden al 0 y al 1 de un bit clásico. Sin embargo, en mecánica cuántica, *cualquier* objeto que tenga dos estados diferentes necesariamente poseerá además, un conjunto de otros estados posibles, conocidos como superposiciones, que incluyen ambos estados en grados distintos. Los estados permitidos de un qubit son precisamente todos aquellos estados que podrían definir un bit clásico trasplantado al mundo cuántico. Los estados de un qubit corresponden a los puntos de la superficie de una esfera, con el 0 y el 1 en los polos sur y norte (*véase el recuadro* “Explicación de los qubits”). El continuo de estados entre el 0 y el 1 causa muchas de las extraordinarias propiedades de la información cuántica.

¿Cuánta información clásica podemos almacenar en un qubit? Una línea de razonamiento sugiere que la cantidad es infinita: para especificar un estado cuántico hemos de comunicar la latitud y la longitud del punto correspondiente de la esfera y, en principio, cabe dar ambas con una precisión arbitraria. Tales números pueden codificar una larga cadena de bits. Por ejemplo, 011101101... podría corresponder a un estado de latitud 01 grados, 11 minutos y 01,101... segundos.

Este razonamiento, aunque parezca correcto, no lo es. Cabe codificar una cantidad infinita de información clásica en un único qubit, pero nunca se podrá recuperarla del qubit. El más simple intento de leer el estado del qubit, una medición corriente, directa del mismo, daría un resultado de 0 o de 1, polo sur

o polo norte, con la probabilidad de cada resultado determinada por la latitud del estado original. Se podría haber elegido una medición diferente, quizás usando el eje “Melbourne-islas Azores” en lugar del norte-sur, pero de nuevo se habría extraído sólo un bit de información, aunque gobernado por probabilidades con una dependencia diferente de las latitudes y longitudes del estado. Cualquiera que sea la medición que se elija, se borra toda la información del qubit, excepto la del único bit que la medición saca a luz.

Los principios de la mecánica cuántica nos vedan la extracción de más de un solo bit de información, con independencia de la maña que nos demos en codificar el qubit o el ingenio con que lo midamos después. Este sorprendente resultado fue demostrado en 1973 por Alexander S. Holevo, del Instituto Matemático Steklov de Moscú, a partir de una conjetura propuesta en 1964 por J. P. Gordon, de los Laboratorios AT&T Bell. Es como si el qubit contuviera información escondida que podemos manipular, pero a la que no podemos acceder directamente. Sin embargo, es mejor considerar esta información escondida como una unidad de información cuántica en vez de suponerla un número infinito de inaccesibles bits clásicos.

Observemos cómo este ejemplo sigue el paradigma de la ciencia de la información enunciado por Schumacher. Gordon y Holevo se preguntaron cuántos qubits (el recurso físico) se requieren para almacenar una cantidad dada de información clásica (la tarea) de manera tal, que la información pueda ser recuperada (el criterio de éxito). Además, para responder esta cuestión, Gordon y Holevo introdujeron un concepto matemático, ahora conocido como la chi de Holevo (simbolizado por la letra griega *chi*), que desde entonces ha servido para simplificar el análisis de fenómenos más complejos de una manera que recuerda a las simplificaciones posibilitadas por la entropía de Shannon. Por ejemplo, Michal Horodecki, de la Universidad de Gdansk, en Polonia, ha demostrado que con la chi de Holevo cabe analizar un problema análogo a la compresión de datos clásica considerada por Shannon: la compresión de estados cuánticos producidos por una fuente de información cuántica.

Estados entrelazados

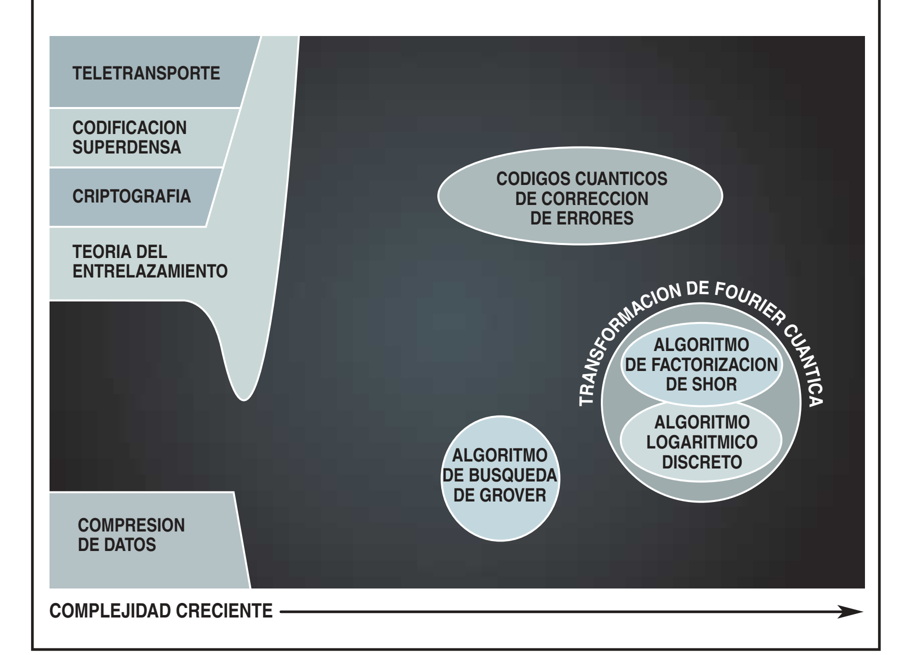
Los qubits individuales son interesantes, pero cuando se combinan varios aparece un comportamiento aún más fascinante. Una característica clave de la ciencia de la información cuántica es la constatación de que grupos de dos o más objetos cuánticos pueden tener estados entrelazados. Estos estados entrelazados poseen propiedades fundamentalmente distintas de las que caracterizan a cualquier ente de la física clásica. Se empieza a considerarlos como un tipo en verdad nuevo de recurso físico, apto para realizar tareas de interés.

Schrödinger estaba tan impresionado por el entrelazamiento, que en un trabajo germinal de 1935 (el mismo año en que presentó su gato al mundo) escribió que no era “*un* rasgo característico, sino *el* rasgo característico de la mecánica cuántica, el que la aparta por completo de las líneas de pensamiento clásicas”. Los miembros de una colección de objetos entrelazados no tienen su propio estado cuántico individual. Sólo el grupo como conjunto presenta un estado bien definido (*véase el recuadro* “Desenlazar el entrelazamiento”*)*. Este fenómeno es mucho más peculiar que un estado de superposición de una sola partícula. Esta posee un estado cuántico bien definido, aunque consista en la superposición de diferentes estados clásicos.

Los objetos entrelazados se comportan como si estuvieran conectados entre sí, con independencia de lo alejados que se hallen el uno del otro —la distancia no atenúa lo más mínimo el entrelazamiento—. Si cierto ente se halla entrelazado con otros objetos, una medición que

DESCONOCIDAS TIERRAS CUANTICAS

LOS CIENTIFICOS DE LA INFORMACION CUANTICA aún están cartografiando la vasta topografía de su naciente campo. Ya se comprenden bien algunos de los procesos más sencillos, como el teletransporte y la criptografía cuántica. Por el contrario, fenómenos complejos, como la corrección cuántica de errores y el algoritmo de factorización de Peter N. Shor, están rodeados de grandes porciones de *terra incognita*. Los trabajos que persiguen una teoría general del entrelazamiento, análoga a la teoría de la energía que encarna la termodinámica, intentan salvar los vanos entre lo sencillo y lo complejo.



BRYAN CHRISTIE

DESENLAZAR EL ENTRELAZAMIENTO

SI LOS DADOS pudieran estar “entrelazados” como las partículas cuánticas, cada par entrelazado daría el mismo resultado, aun cuando se lanzaran a años luz de distancia o en instantes muy diferentes.





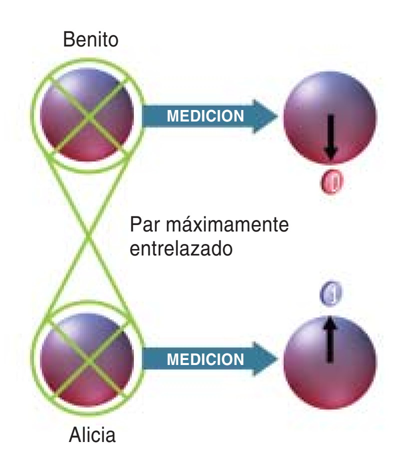






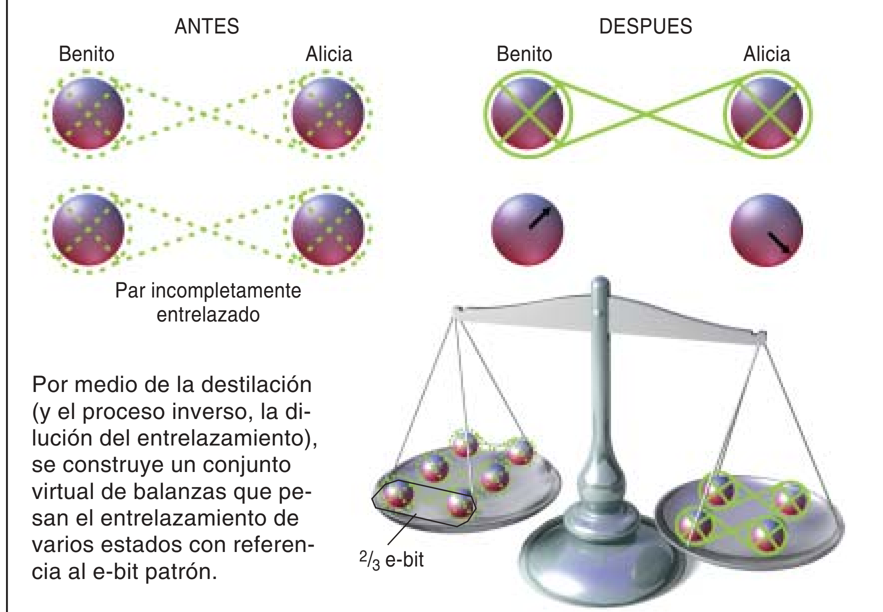
El E-Bit estándar

CUANDO DOS QUBITS están entrelazados, ya no tienen estados cuánticos individuales. En su lugar, se define una relación entre qubits. Por ejemplo, en un par máximamente entrelazado, los qubits dan resultados opuestos cuando se los mide. Si uno da 0, el otro da 1, y viceversa. Un par máximamente entrelazado tiene un “e-bit” de entrelazamiento.



El peso del entrelazamiento

LOS PARES NO DEL TODO ENTRELAZADOS contienen menos de un e-bit. Si Alicia y Benito comparten dos pares parcialmente entrelazados, pueden intentar “destilar” el entrelazamiento en un único par. Si la destilación produce un par máximamente entrelazado, entonces Alicia y Benito saben que sus pares contenían en un principio un total de, por lo menos, un e-bit de entrelazamiento.

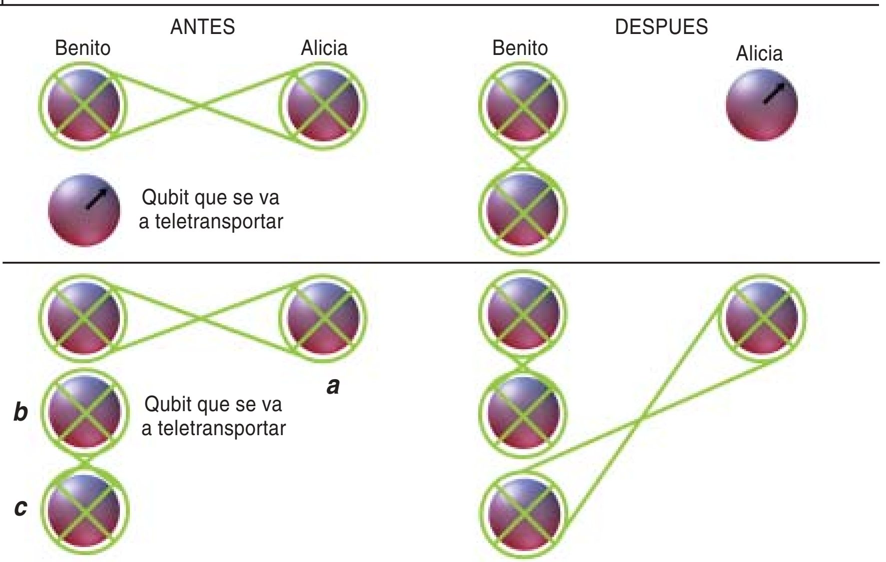


Por medio de la destilación (y el proceso inverso, la dilución del entrelazamiento), se construye un conjunto virtual de balanzas que pesan el entrelazamiento de varios estados con referencia al e-bit patrón.

Teletransporte cuántico

SI ALICIA Y BENITO comparten un e-bit, pueden teletransportar un qubit. El e-bit compartido se “gasta”: ya no lo comparten después de teletransportarlo.

Si Benito teletransporta uno de los dos miembros (*b*) de un par entrelazado a Alicia, el entrelazamiento de tal partícula con su compañera original (*c*) se transfiere a la partícula de Alicia (*a*). Sin embargo, Alicia y Benito no pueden valerse del teletransporte para aumentar su capital de e-bits compartidos.



BRYAN CHRISTIE

El autor

MICHAEL A. NIELSEN es profesor asociado del departamento de física de la Universidad de Queensland, en Brisbane, Australia. Natural de Brisbane, recibió su doctorado en física como becario Fulbright en la Universidad de Nuevo México en 1998. Es el autor, con Isaac L. Chuang, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, del primer libro de texto de ciencia de la información cuántica, *Quantum Computation and Quantum Information.*

se le haga proporcionará a la vez información acerca de éstos. Es fácil confundirse, pensar que el entrelazamiento vale para enviar señales más deprisa que la velocidad de la luz, violando la relatividad especial de Einstein, pero la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica desbarata tal posibilidad.

A pesar de su singularidad, durante mucho tiempo los físicos vieron en el entrelazamiento una mera curiosidad y apenas si le prestaron atención. Ese enfoque cambió en el decenio de 1960, cuando John S. Bell, del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, cerca de Ginebra, predijo que gracias a los estados cuánticos entrelazados cabía realizar pruebas experimentales decisivas que distinguían entre la mecánica cuántica y la física clásica. Bell predijo, y los experimentadores han confirmado, que los sistemas cuánticos entrelazados exhiben un comportamiento imposible en un mundo clásico. Imposible, ¡incluso aunque se cambiasen las leyes de la física, dentro de un marco clásico, para que emularan las predicciones cuánticas! El entrelazamiento representa una característica de nuestro mundo que nos resulta hasta tal punto nueva, que incluso los expertos encuentran muy difícil pensar sobre él. Aunque se puedan usar las matemáticas de la teoría cuántica para razonar acerca del entrelazamiento, tan pronto se vuelve a las analogías se corre el riesgo de que, con su fundamento clásico, nos lleven por un camino errado.

En los primeros años del decenio de 1990, la idea de que el entrelazamiento cae completamente fuera del ámbito de la física clásica indujo a los investigadores a preguntarse si no sería un recurso útil para resolver de maneras nuevas problemas de procesado de información. La respuesta fue afirmativa. La avalancha de ejemplos empezó en 1991, cuando Artur K. Ekert, de la Universidad de Cambridge, enseñó cómo valerse del entrelazamiento para distribuir claves criptográficas inviolables. En 1992 Charles H. Bennett, de IBM, y Stephen Wiesner, de la Universidad de Tel Aviv, mostraron que el entrelazamiento podía ayudar a la transmisión de información clásica de un lugar a otro (se trata de un proceso llamado codificación superdensa, donde dos bits se transfieren a una partícula que parece que sólo tiene capacidad para llevar uno). En 1993, un equipo internacional de seis científicos explicó cómo se "teletransportaba" un estado cuántico de un lugar a otro por medio del entrelazamiento. Vino luego una riada de aplicaciones.

La calibración del entrelazamiento

Como ocurre con los qubits individuales, que se pueden representar con muchos objetos físicos diferentes, el entrelazamiento también tiene propiedades independientes de su representación física. Por razones prácticas, será más conveniente trabajar con un sistema u otro, pero, en cuanto a los principios, no importará cuál se elija. Por ejemplo, se podrá llevar a cabo la criptografía cuántica con un par de fotones, o de núcleos atómicos, o incluso con un fotón y un núcleo, mientras estén entrelazados.

La independencia de la representación sugiere una analogía entre entrelazamiento y energía que mueve a la reflexión. La energía obedece las leyes de la termodinámica, ya se trate de energía química, energía nuclear o de cualquier otro tipo. ¿Podría desarrollarse una teoría general del entrelazamiento siguiendo líneas similares a las de las leyes de la termodinámica?

Esta esperanza se fortaleció durante la segunda mitad del decenio de 1990, al demostrarse la equivalencia cualitativa de diferentes formas de entrelazamiento (el entrelazamiento de un estado se puede transferir a otro, tal y como la energía fluye de, digamos, un cargador de baterías a una batería). Partiendo de estas relaciones cualitativas, va habiendo medidas cuantitativas del entrelazamiento. Se trata de trabajos aún en marcha; no existe un acuerdo acerca de la mejor forma de cuantificar el entrelazamiento. Hasta ahora, la que más éxito ha tenido se basa en una unidad patrón de entrelazamiento, afín a una unidad patrón de masa o de energía.

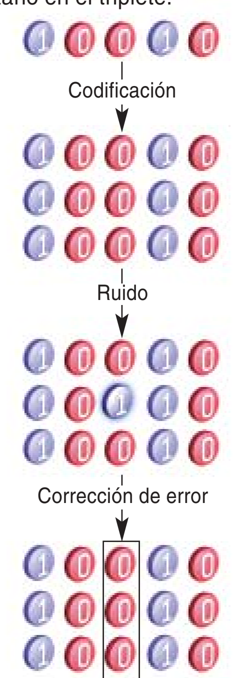
Este enfoque recuerda la forma en que se miden las masas con una balanza. La masa de un objeto se define por cuántas copias del patrón de masa se necesitan para equilibrarla en un instrumento graduado. Los científicos de la información cuántica han desarrollado una teórica "balanza del entrelazamiento" para comparar el entrelazamiento de dos estados diferentes. La cantidad de entrelazamiento en un estado se define por el número de copias de alguna unidad patrón de entrelazamiento prefijada que se requiera para equilibrarla en la "pesada". Observemos que este método de cuantificar el entrelazamiento es un caso más de la pregunta fundamental de la ciencia de la información. Hemos identificado un recurso físico (las copias de nuestros estados entrelazados) y una tarea con un criterio de éxito. Definimos nuestra medida del entrelazamiento preguntándonos qué cantidad de nuestro recurso físico necesitamos para realizar con éxito la tarea.

Las medidas cuantitativas del entrelazamiento desarrolladas conforme a este programa están demostrando una enorme utilidad como conceptos unificadores en la descripción de una amplia gama de fenómenos. Las medidas del entrelazamiento contribuyen a que se analicen mejor el teletransporte cuántico y los algoritmos de los computadores mecanocuánticos. De nuevo ayuda la analogía con la energía: para entender las reacciones químicas o el funcionamiento de un motor, estudiamos el flujo de energía entre las distintas partes del sistema correspondiente y determinamos las restricciones a que ha de someterse en los distintos lugares y tiempos. De manera similar, podemos analizar el

CORRECCION DE ERRORES

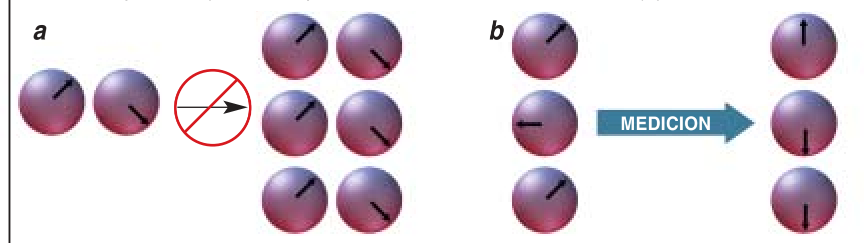
Código clásico de repetición

ESTE SENCILLO METODO CLASICO de reducción de errores codifica cada bit como un triplete de bits idénticos. Si el ruido invierte un bit, el error puede corregirse enmendando el bit minoritario en el triplete.

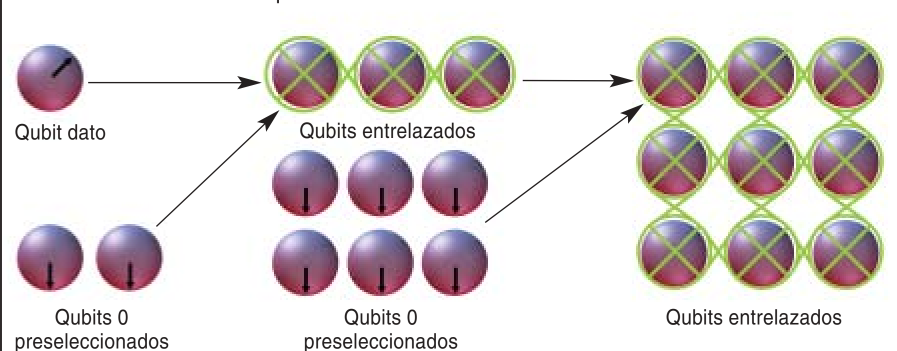


Corrección de errores para qubits

LA ESTRATEGIA DE LA REPETICION es imposible con los qubits por dos razones. Primero, no se pueden clonar perfectamente los qubits con estados desconocidos (*a*). Incluso si se produjeran duplicados (por ejemplo, si se ejecutasen múltiples copias de la computación), una simple medición no revelaría errores (*b*).



UN CODIGO CUANTICO DE CORRECCION DE ERRORES funciona entrelazando cada qubit de datos con dos qubits 0 preseleccionados. Estos tres qubits, a su vez, se entrelazan con otros seis. Medidas conjuntas de pares de qubits revelarán si uno de esos nueve qubits sufre un error y, si así es, cómo corregirlo sin perturbar los estados individuales de los qubits.



BRYAN CHRISTIE

flujo de entrelazamiento, de un subsistema a otro, que se requiere para ejecutar una tarea de procesamiento cuántico de la información, de modo que obtengamos las condiciones límite —de los recursos— que se exigen para llevar a cabo dicha labor.

El desarrollo de la teoría del entrelazamiento es un ejemplo de construcción de abajo arriba: se empieza por sencillas cuestiones relativas al equilibrio del entrelazamiento y gradualmente se avanza hacia fenómenos más complejos. En unos pocos casos, ha habido quien ha penetrado en fenómenos complejísimos gracias a una feliz intuición que posibilitó el progreso de arriba abajo. El ejemplo más famoso es el algoritmo para encontrar rápidamente los factores primos de un entero con un computador cuántico, formulado en 1994 por Peter W. Shor, de los Laboratorios AT&T Bell. En un computador clásico, los mejores algoritmos conocidos necesitan recursos exponencialmente crecientes para factorizar números cada vez mayores. Un número de 500 dígitos necesita 100 millones de veces más pasos de cómputo que un número de 250 dígitos. El coste del algoritmo de Shor crece de manera polinómica —un número de 500 dígitos sólo requiere ocho veces los pasos de un número de 250 dígitos.

El algoritmo de Shor es otro espécimen del paradigma básico (¿cuánto tiempo computacional se necesita para encontrar los factores de un entero de *n* bits?), pero parece estar aislado de la mayor parte de los resultados de la ciencia de la información cuántica (*véase el recuadro* "Desconocidas tierras cuánticas"*)*. A primera vista, da la impresión de que se trata de un inteligente truco de programación, con poca significación fundamental. Esta apariencia es engañosa; se ha demostrado que cabe interpretar el algoritmo de Shor como un caso particular de un procedimiento para determinar los niveles de energía de un sistema cuántico, proceso que, ni que decir tiene, es más fundamental. A medida que el tiempo avance y profundicemos en el tema, más fácil resultará entender los principios que se esconden tras el algoritmo de Shor y otros algoritmos cuánticos, y además, esperamos, más fácil será también desarrollar nuevos algoritmos.

Una última aplicación, la corrección cuántica de errores, proporciona la mejor prueba, hasta la fecha, de que la ciencia cuántica de la información constituye un marco útil para el estudio del mundo. Los estados cuánticos son delicados; las interacciones esporádicas o el ruido los destruyen con facilidad, de manera que los métodos que compensan esas perturbaciones resultan esenciales.

La computación y las comunicaciones clásicas ofrecen un reperto-

rio bien desarrollado de códigos de corrección de errores a fin de proteger la información de los estragos del ruido. Un sencillo ejemplo es el código de repetición (*véase el recuadro* "Corrección de errores"). Este método representa el bit 0 como una cadena de tres bits, 000, y el bit 1 como una cadena de tres bits, 111. Si el ruido es débil, de vez en cuando cambiará uno de los bits de un triplete; de un 000 hará, por ejemplo, un 010, pero la probabilidad de que invierta dos bits de un triplete será mucho menor. Siempre que encontremos 010 (o 100, o 001), podremos estar casi seguros de que el valor correcto es 000, o sea, 0. Generalizaciones más complejas de esta idea proporcionan códigos de corrección de errores que protegen muy bien la información clásica.

Corrección cuántica de errores

Inicialmente parecía imposible que se elaboraran códigos de corrección cuántica de errores, ya que la mecánica cuántica nos prohíbe saber con certeza el estado desconocido de un objeto cuántico —de nuevo el obstáculo de intentar extraer más de un bit de un qubit—. El sencillo código clásico del triplete falla, pues; no se puede examinar cada copia de un qubit y, durante el proceso, ver que una de ellas debe descartarse sin arruinar todas y cada una de las copias. Peor aún, hacer las copias iniciales no es trivial: la mecánica cuántica prohíbe tomar un qubit desconocido y, de manera fiable, duplicarlo; así dicta el llamado teorema de imposibilidad de la clonación.

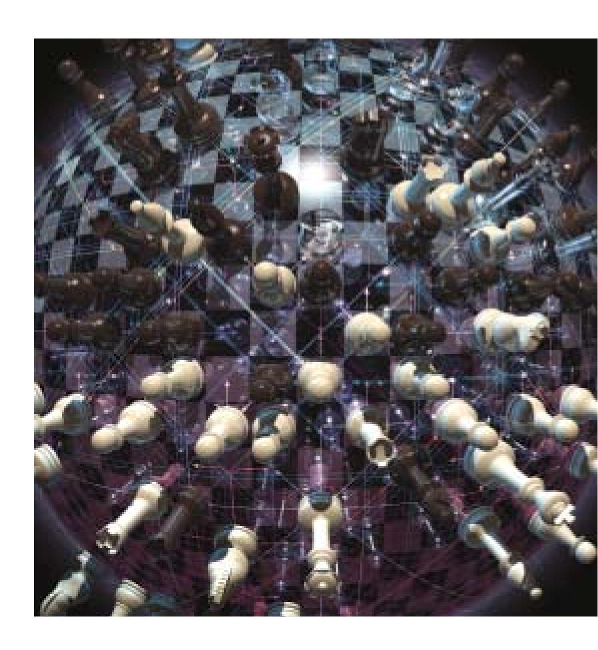
La situación parecía sombría a mitad del decenio pasado; prominentes físicos, como el fallecido Rolf Landauer, de IBM, escribieron artículos escépticos que abundaban en la necesidad de la corrección cuántica de errores para la computación cuántica; mas para ello no podría contarse con los procedimientos clásicos. La especialidad tiene una gran deuda con el escepticismo de Landauer por señalar que se habrían de superar problemas de este tipo [*véase* "A lomos de los electrones", por Gary Stix, en la sección *Perfiles* de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 1998].

Felizmente, Shor y Andrew M. Steane, de Oxford, enseñaron por separado en 1995 la forma de ejecutar la corrección cuántica de errores sin tener que saber cuáles eran los estados de los qubits o sin tener que clonarlos. Como con el código del triplete, cada valor se representa por un conjunto de qubits. Se los pasa por un circuito (el análogo cuántico de las puertas lógicas) que enmendará un error que pueda afectar a cualquiera de los qubits sin "leer" realmente cuáles son los estados individuales. Es como si se pudiera hacer circular el triplete 010 por un circuito que discerniese que el bit intermedio era diferente y lo invirtiera sin determinar la identidad de ninguno de los tres bits.

Los códigos cuánticos de corrección de errores son un triunfo de la ciencia. Algo que personas brillantes pensaban que no podría hacerse —proteger los estados cuánticos de los efectos del ruido—, se ha conseguido gracias a una combinación de ideas de la ciencia de la información y de la mecánica cuántica básica. Hoy, estas técnicas han recibido una primera confirmación en los experimentos realizados en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, la IBM y el Instituto de Tecnología de Massachusetts; hay planeados ensayos más amplios.

La corrección cuántica de errores también ha estimulado muchas nuevas y apasionantes ideas. Por ejemplo, el ruido mecanocuántico limita los mejores relojes actuales; los investigadores se preguntan si la precisión de estos relojes podría mejorarse por medio de la corrección cuántica de errores. Pudiera también ocurrir, como propone Alexei Kitaev, del Instituto de Tecnología de California, que algunos sistemas físicos poseyesen una especie de tolerancia natural al ruido. Tales sistemas recurrirían a la corrección cuántica de errores sin la intervención humana y mostrarían una extraordinaria resistencia intrínseca contra la decoherencia.

Hemos explorado cómo la ciencia cuántica de la información progresa desde las cuestiones fundamentales hasta el conocimiento de sistemas más complejos. ¿Qué nos aguarda en el futuro? Siguiendo el programa de Schumacher, seguramente profundizaremos más en la capacidad del universo de procesar la información. Quizá los métodos de la ciencia cuántica de la información nos aporten conocimientos incluso acerca de sistemas que, tradicionalmente, no se consideran procesadores de información. Así, la materia condensada exhibe fenómenos complejos, la superconductividad a alta temperatura, el efecto Hall cuántico fraccionario, que presentan propiedades cuánticas, como el entrelazamiento, cuyo papel no está claro por el momento. Aplicando lo que hemos aprendido de la ciencia de la información cuántica, podremos potenciar mucho nuestra habilidad en la partida de ajedrez que tenemos entablada con el complicado universo cuántico.



Bibliografía complementaria

QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Dirigido por John A. Wheeler y Wojciech H. Zurek. Contiene reimpresiones de trabajos fundamentales, incluida una traducción del trabajo de 1935 donde Erwin Schrödinger expuso la "paradoja del gato". Princeton University Press, 1983.

THE FABRIC OF REALITY. David Deutsch. Penguin Books, 1998.

THE BIT AND THE PENDULUM. TOM SIEGFRIED. John Wiley & Sons, 2000.

QUANTUM COMPUTATION AND QUANTUM INFORMATION. Michael A. Nielsen e Isaac L. Chuang. Cambridge University Press, 2000.

Procesos electrónico-vibracionales

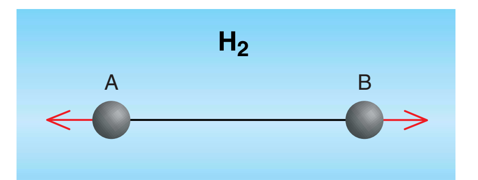
La naturaleza e implicaciones del acoplamiento electrónico-vibracional, o vibrónico, hallan su explicación en el acoplamiento entre iones nucleares y electrones

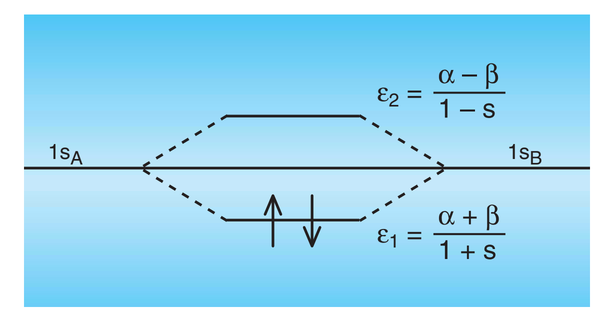
Roberto Acevedo

El experimento no es más que una pregunta que le planteamos a la naturaleza. Razonaba Paul M. Dirac que la observación de un objeto, al hacer incidir radiación sobre éste, producía una alteración o perturbación. La alteración provocada será pequeña si el objeto es grande; grande, si el objeto es pequeño.

Al aumentar la capacidad del experimentador con el progreso de la técnica crece, cabe suponer, la precisión de la observación o, dicho de otro modo, decrece el error asociado a la observación. Pero la naturaleza no se comporta de una forma tan lineal. Hemos de aceptar la existencia de un límite, intrínseco e independiente del experimentador y del avance de la técnica. Lo comprobaremos a lo largo del estudio de las bases del enlace químico. Aquí nos detendremos en una de sus manifestaciones particulares, que responde al acoplamiento entre los movimientos de los núcleos y de los electrones en un sistema molecular.

Hay en la naturaleza un conjunto infinito de agregados atómicos estables, que, por definición, deben exhibir algún compromiso óptimo de fuerzas de atracción y de repulsión. Existen fuerzas de corto, mediano y largo alcance. La situación más simple sería un conjunto discreto de cargas puntuales, unas positivas y otras negativas.





1. ORBITALES MOLECULARES enlazantes y antienlazantes para el estado fundamental de la molécula de hidrógeno. Los dos niveles de energías correspondientes a la mezcla de los orbitales (*1s*) de los átomos de hidrógeno se simbolizan con los índices A y B. En nuestra notación, los parámetros α, β y *S* representan la energía de un electrón en el estado (*1s*), la energía en la zona de recubrimiento de las densidades de cargas electrónicas y el volumen de esta zona. Los parámetros α y β son negativos en magnitud; *S* es positivo. El electrón de la molécula ion de hidrógeno debe pasar la mayor parte del tiempo en el estado de menor energía, es decir, en el orbital molecular enlazante. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, existirá el orbital molecular imagen, que corresponde al orbital molecular antienlazante.

ROBERTO ACEVEDO

En ese marco operan las fuerzas de largo alcance de Coulomb; la observación experimental nos indica que las cargas de igual signo se repelen y las cargas de signos distintos se atraen.

Si de la situación puntual pasamos al dominio de los átomos, aumenta la complejidad. En su eslabón más sencillo, encontramos la molécula ion de hidrógeno, resultante del proceso de extraer del sistema neutro H_2 uno de los electrones. La energía que se requiere para este proceso endotérmico (que absorbe energía) se denomina primer potencial de ionización molecular. De acuerdo con el principio general de conservación de las cargas, este electrón debe ser captado por otro agregado atómico o molecular deficitario de carga.

El sistema formado por la molécula ion de hidrógeno H_2^+ es inestable con respecto a la molécula neutra. En una visión clásica y en un tiempo arbitrario, los dos hidrógenos atómicos se encuentran separados a una distancia infinitamente grande: no hay interacción entre ellos. En tal situación hipotética, los electrones de ambos hidrógenos por separado pasan la mayor parte del tiempo en una región del espacio de

menor energía, en su estado fundamental (1s).

Permitamos que estos hidrógenos dejen las posiciones de aislamiento e inicien un proceso de mutuo acercamiento. La molécula neutra permanece estable y las densidades de cargas de los hidrógenos se aproximan hasta una distancia óptima, la longitud de enlace; corresponde ésta a un mínimo global de energía.

Los átomos de un sistema molecular vibran con respecto a sus posiciones nucleares de equilibrio, de mínimo global de energía. Desde un punto de vista teórico, podríamos concebir distancias menores que la correspondiente a la longitud de enlace a una temperatura dada. Sin embargo, ello llevaría asociado configuraciones moleculares de inestabilidad creciente (salvo que estén sometidas a grandes presiones, por ejemplo).

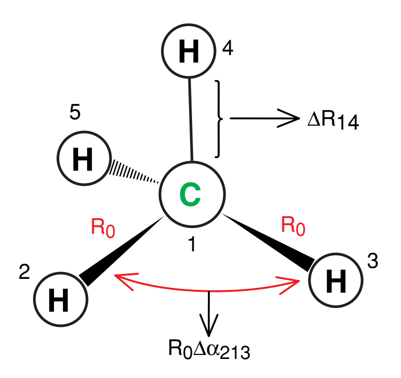
Puesto que el principio de exclusión de Fermi prohíbe la penetración total de un cuerpo en otro, sólo podemos esperar, para el sistema molecular neutro, recubrimientos parciales de sus densidades de cargas electrónicas. El par de electrones, responsable del enlace químico, pasará su mayor parte del tiempo en esa zona de recubrimiento. En el sistema molécula ion de hidrógeno, la energía involucrada en la semirreación química (primer potencial de ionización de la molécula) debe contener una contribución energética que posibilite el proceso de desaparear el par de electrones del sistema neutro y dejar el camino abierto para que el sistema libere uno de sus electrones.

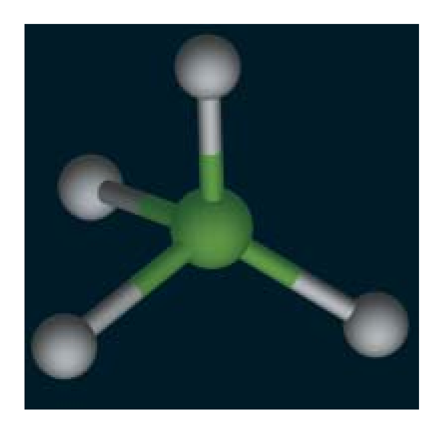
De acuerdo con el principio de superposición de estados, podemos describir un estado general como un estado mezcla de otros conocidos. En la descripción matemática del estado mezcla, o híbrido, aparecen coeficientes de mezclas de interés para la teoría. En términos generales, podemos considerar el estado basal de la molécula de hidrógeno un estado híbrido, producto de la combinación de dos orbitales atómicos del tipo (1s), uno para cada uno de los átomos de hidrógeno constituyentes del fragmento molecular H_2^+.

Los coeficientes de la mezcla serán función de la energía del sistema. En física, para proceder a la optimización de los estados globales se aplica el método de variaciones. Consiste éste en buscar el valor de los coeficientes para lograr un mínimo de energías, es decir, para obtener la configuración nuclear de máxima estabilidad del sistema.

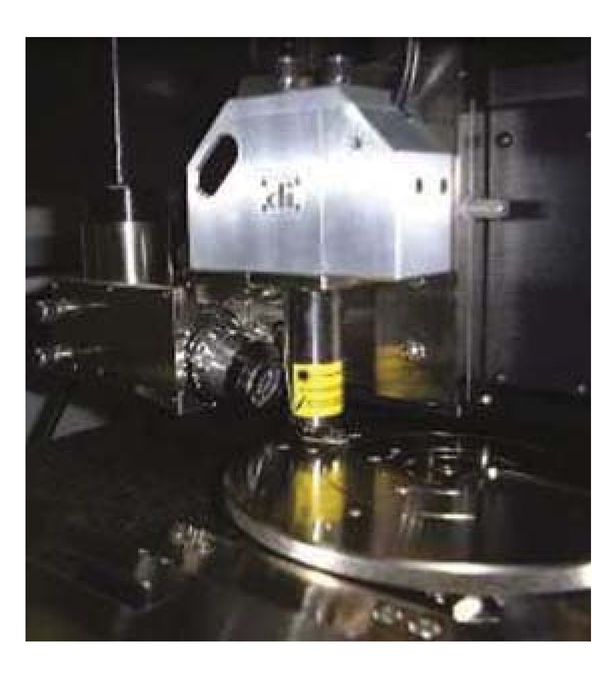
Al operar así, aparecen dos estados moleculares permitidos, resultantes de la interacción entre estados de igual simetría (1s) de los hidrógenos constituyentes y, adicionalmente, de igual energía. Bajo tales condiciones, las interacciones más fuertes se generan entre estados permitidos de los átomos constituyentes de igual simetría y de energías equiparables.

El concepto de simetría emerge, pues, de un modo natural. En efecto, el sistema es lineal; por convención, las densidades de cargas de los dos núcleos constituyentes se concentran a lo largo del eje de cuantización (eje Z). De esta forma, y en la simetría cilíndrica asociada a este tipo de moléculas lineales, suelen asignarse símbolos de simetría: el número cuántico magnético toma los valores permitidos $l = 0, 1, 2, ..., (n - 1)$, donde l es el nú-





2. DESCRIPCION DEL CONJUNTO DE COORDENADAS INTERNAS de la molécula de metano. Si examinamos las tensiones de los enlaces carbono-hidrógeno, distinguiremos las coordenadas internas correspondientes a variaciones de las longitudes de enlaces R_{jk}, donde j = 1; k = 2, 3, 4, 5. Y como producto de las vibraciones moleculares, resultarán deformaciones de los ángulos de enlace $R_0\alpha_{jkl}$. (R_0 corresponde al valor de la longitud de enlace efectivo entre los núcleos de carbono e hidrógeno en el metano.) Existen cuatro coordenadas internas correspondientes a las variaciones en las longitudes de enlace y seis asociadas a las deformaciones en los ángulos de enlace. Se origina, pues, un total de diez coordenadas internas.



3. MICROSCOPIO de fuerza atómica que nos permite caracterizar superficies del tamaño de una fracción de nanómetros, medir fuerzas moleculares en ambiente de aire o líquido y fuerzas laterales.

ROBERTO ACEVEDO (*arriba*); CORTESIA DE PEDRO TOLEDO DEL LABORATORIO DE NANOSCOPIA DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCION DE CHILE (*abajo*)

El autor

ROBERTO ACEVEDO es profesor titular de la Universidad de Chile. Doctorado en la Universidad de Londres, completó su formación en la Universidad de Virginia en Charlottesville.

mero cuántico secundario (azimutal) y n el número cuántico principal. Los valores del número cuántico magnético 0, ± 1, ± 2,..., ± l, se asignan a las simetrías σ, π, δ, etcétera.

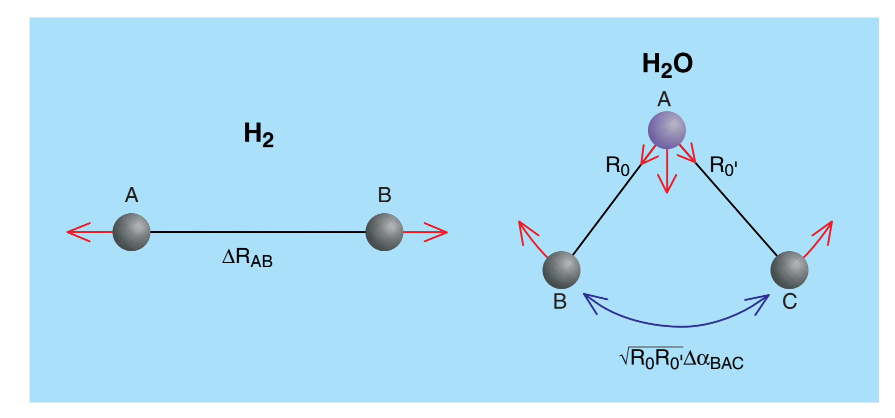
En el híbrido las interacciones más fuertes se producen entre orbitales de igual simetría y de energías comparables. La interacción dominante se da, por tanto, entre los dos orbitales (1s), uno para cada uno de los hidrógenos. Los orbitales producto corresponden a orbitales moleculares y representan una aproximación razonable al estado fundamental, o de menor energía, del agregado iónico.

Al ahondar en este sistema aparecen dos orbitales moleculares: uno enlazante y el otro antienlazante. En el primero no existe "nodo" alguno entre los núcleos del sistema, mientras que en el orbital antienlazante media un "nodo" entre los núcleos constituyentes. Por "nodo" debe entenderse un punto donde se anula la amplitud de la función y, en consecuencia, la probabilidad de presencia es cero.

En el orbital molecular enlazante el máximo de probabilidad de presencia se produce en la zona correspondiente a la bisectriz entre los núcleos. Para el orbital molecular antienlazante, esta probabilidad es nula. De lo que se infiere que cuanto mayor sea el número de nodos, más positivas serán las energías asociadas y corresponderán a estados excitados.

Por física cuántica del átomo de hidrógeno, sabemos que la energía del estado basal es de –13,60 electronvolt, valor que simbolizamos con la letra α. Con la letra β denotaremos la energía del par de electrones de la molécula en la región de recubrimiento angular; S indicará el volumen de esta zona de traslape. Los parámetros α, β y S designan, pues, la energía de un electrón en el estado (1s), la energía en la zona de recubrimiento de las densidades de cargas electrónicas y el volumen de esta zona, respectivamente.

Los parámetros α y β son negativos en magnitud, en cambio S es positivo. De ello se infiere que el electrón de la molécula ion de hidrógeno —con espín "arriba" o "abajo"— debe pasar la mayor parte del tiempo en el estado de menor energía, vale decir, en el orbital molecular enlazante. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, existirá el orbital molecular imagen, que corresponde al orbital molecular antienlazante.



4. PROYECCIONES de las coordenadas internas, tensiones y deformaciones, en las moléculas de hidrógeno y de agua. Las flechas dibujadas en los centroides de las densidades de cargas nucleares indican la dirección y sentido esperado en el movimiento de estos núcleos al ser descritos por estas coordenadas internas. Así vemos que en el sistema H_2, en la descripción de la tensión del enlace los núcleos tienden a alejarse linealmente uno de otro; en cambio, en la molécula de agua el movimiento tiende a abrir el ángulo de enlace lo máximo posible. En ambos casos, estos desplazamientos nucleares parciales preservan la posición del centro de masas.

ROBERTO ACEVEDO

Vibraciones moleculares

Consideremos ahora un sistema molecular constituido por núcleos, con densidades de carga positivas, y electrones, con densidades de carga negativas. En una primera aproximación al problema, podemos suponer la energía del sistema como una contribución de diversos términos, diagonales y no diagonales. Las contribuciones diagonales corresponden a términos debidos a movimientos electrónicos y nucleares; estos últimos pueden ser rotacionales o vibracionales. Las contribuciones no diagonales se dan entre pares de energías de acoplamiento electrónico-vibracional, vibracional-rotacional. No se agotan ahí las contribuciones a la energía total del sistema.

Abordado el sistema como un todo, tenemos las rotaciones y traslaciones. En el movimiento de dicho sistema no varían las longitudes de enlace, ni los ángulos de enlace. En el caso de moléculas lineales, descartando la rotación alrededor del eje de la molécula, existen cinco grados de libertad asociados a estos movimientos; en cambio, para sistemas no lineales el número de grados de libertad es seis. Para designar estos movimientos se emplea una notación específica: T_l indica las traslaciones del sistema como un todo a lo largo de los tres ejes cartesianos y por R_l se entiende las rotaciones del sistema como un todo alrededor de un eje imaginario que pasa por su centro de masas. Cuando se trata de sistemas lineales, así el ácido cianhídrico (HCN), dióxido de carbono (CO_2) y otros, se excluye la rotación R_z.

El número de grados de libertad vibracionales es $(3N - 6)$ en los sistemas no lineales y $(3N - 5)$ en los lineales, donde N representa el número de núcleos de la molécula. A modo de ejemplo, el metano CH_4, un sistema orgánico simple, con cinco núcleos constituyentes



5. MICROSCOPIO **de efecto túnel que nos permite caracterizar superficies conductoras o semiconductoras con una resolución de fracción de nanómetro.**

presentará un total de nueve grados de libertad vibracionales.

En general, los núcleos del sistema vibran con respecto a sus posiciones de equilibrio, incluso a temperaturas bajísimas. La teoría cuántica no admite núcleos con movimiento congelado. Pero las amplitudes de vibración son pequeñas.

Para avanzar en la comprensión de los movimientos nucleares vibracionales precisamos de un esquema geométrico simple. Aunque desconocemos la función de energía potencial vibracional, sí parece que ésta depende de las distancias relativas entre las partículas constituyentes del sistema. En el esquema geométrico basta con introducir un conjunto de coordenadas internas y combinarlas luego entre sí, según criterios de simetría.

La molécula de metano

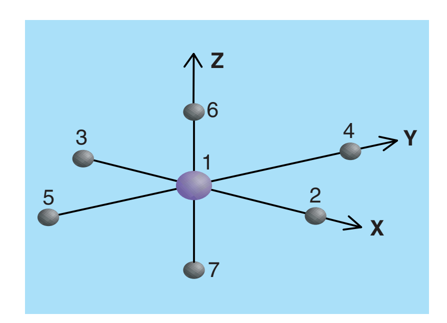
Una primera aproximación del metano consiste en examinar las tensiones de los enlaces carbono-hidrógeno. Tendremos con ello las coordenadas internas correspondientes a variaciones de las longitudes de enlaces R_{jk}, donde $j = 1$; $k = 2, 3, 4, 5$. Y como producto de las vibraciones moleculares, resultarán deformaciones de los ángulos de enlace $R_0\alpha_{jkl}$. En nuestra notación, R_0 corresponde al valor de la longitud de enlace efectivo entre los núcleos de carbono e hidrógeno en el metano.

Existen cuatro coordenadas internas correspondientes a las variaciones en las longitudes de enlace y seis asociadas a las deformaciones en los ángulos de enlace. Se origina, pues, un total de diez coordenadas internas. Este conjunto de diez coordenadas internas puede servirnos de base para iniciar un estudio de la componente vibracional a la energía total del sistema.

Si nos apoyamos en razones de simetría, se aprecia que las tensiones de las longitudes de enlaces se mezclan entre sí, al igual que las deformaciones de los ángulos de enlace. Para mantener la coherencia en las unidades de las tensiones y de las deformaciones, se ponderan las deformaciones de los ángulos de enlaces por el valor de la longitud de enlace experimental R_0.

A las combinaciones lineales de coordenadas internas se las denomina coordenadas de simetrías. Necesitaremos luego una descripción razonable para el campo de fuerzas vibracional, hasta llegar a la resolución de las ecuaciones de movimiento vibracionales para el sistema.

Para obtener las ecuaciones de movimiento se aplica el principio de mínima acción. Se trata de resolver las ecuaciones de Lagrange, siendo la función lagrangiana el resultado de la diferencia entre la energía cinética y la potencial. La estructura de estas ecuaciones es tal, que el procedimiento de cálculo se reduce finalmente a una diagonalización de un producto de dos matrices F y G; de energías potencial y cinética, respectivamente.



6. CONFIGURACION NUCLEAR de equilibrio para un octaedro regular. Se trata del ion complejo hexafluoruro de magnesio (IV). En el complejo MnF_6^{2-} en entornos cúbicos, los iones Mn(+4) ocupan sitios octaédricos y se coordinan con seis iones F(–1). Por razones de simplicidad hemos rotulado las densidades de cargas del ion central correspondiente al manganeso, como también de los ligandos fluoruros.

Para proceder a modelar el campo de fuerzas, hemos de partir de las interacciones entre las coordenadas internas del sistema vibrante. Existen diversas aproximaciones a estos tipos de campos, relacionadas con las distintas aproximaciones al problema que se desea resolver. El campo de fuerzas más simple es el wilsoniano; en él se incorporan exclusivamente las interacciones diagonales entre las coordenadas internas. Más allá, se dividen los autores y las propuestas de campos de fuerzas: unos incorporan interacciones diversas entre núcleos enlazados y no enlazados; otros utilizan descripciones distintas de las wilsonianas.

En general, son muy pocos los sistemas para los cuales se dispone de un conjunto suficiente de datos experimentales que nos permita estimar los valores de estas constantes de fuerzas. Por ello mismo, hemos de realizar una serie de aproximaciones, pues no basta con minimizar la desviación cuadráticamente media entre los valores calculados y los experimentales para las frecuencias vibracionales del sistema. Necesitamos, además, cerciorarnos de que las constantes de fuerzas evaluadas posean un sentido físico.

Si disponemos de un campo de fuerzas vibracional razonable, estaremos en condiciones de resolver las ecuaciones de movimiento vibracionales y obtener una descripción aproximada para los modos normales de vibración del sistema. La descripción de los modos normales, que desempeñan un papel central en la teoría, depende de los detalles del campo de fuerzas. Podemos entender los modos como combinaciones lineales de las coordenadas de simetría del sistema.

Aparece una complicación adicional cuando trabajamos con transiciones electrónicas entre estados permitidos y distintos del sistema. Tales estados permitidos se carac-



terizan por una representación en la base de los modos normales; significa ello que los estados distintos exhiben, en principio, modos normales diferentes.

Grupos puntuales y grupos espaciales

Existe un conjunto importante de sistemas moleculares con simetría cúbica. Así se llaman los que presentan todos los elementos de simetría que caracterizan a un cubo. En general, los sistemas de interés son clasificados en grupos puntuales moleculares; para sistemas cristalinos se trata de grupos espaciales. En los grupos puntuales moleculares, por operaciones de simetría, la posición del centro de masas del sistema permanece invariante.

Los sistemas cúbicos simples exhiben características interesantes desde un punto de visto teórico y técnico. En el complejo MnF_6^{2-} en entornos cúbicos, los iones Mn ocupan sitios octaédricos y se coordinan con seis iones F.

Las combinaciones de coordenadas internas del tipo tensión de los enlaces R_{jk} y deformaciones de los ángulos de enlace $R_0\alpha_{jkm}$ nos conducen a coordenadas de simetría. Las combinaciones para una estructura de este tipo se dividen en dos categorías: simétricas y antisimétricas con respecto a la inversión. La inversión es una operación de simetría que corresponde a un eje de rotación impropio de orden dos (S_2). Este eje de rotación impropio en una base dada de coordenadas corresponde al producto de dos operaciones de simetría que conmutan entre sí: una rotación de 180 grados en torno de un eje seguida por una reflexión horizontal, en un plano perpendicular a este eje de rotación.

Si consideramos, además, las coordenadas internas como base, resulta obvio, en el caso de la configuración nuclear de equilibrio de un sistema estable, proyectar las coordenadas internas en términos de desplazamientos cartesianos nucleares (X_L, Y_L, Z_L), donde $L = 1$, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Una situación interesante ocurre para un sistema de siete núcleos, donde el número de grados de libertad vibracionales es $q_v = (3 \times 7 - 6) = 15$. Existirán, por tanto, un total de 15 combinaciones linealmente independientes.

Analicemos las coordenadas de simetría impares frente a la operación de simetría correspondiente a la inversión. Cuando se aplica el operador sobre tales combinaciones lineales, éstas cambian de signo. Podemos, por tanto, abordar combinaciones pares e impares frente a esta operación de simetría, en el caso de estos grupos cúbicos.

Términos diagonales y no diagonales

En general, la energía de un sistema molecular se expresa mediante suma de contribuciones diagonales (electrónicas, vibracionales y rotacionales) y no diagonales (producto del acoplamiento de movimiento electrónico-vibracional, movimiento vibracional-rotacional y otros). Nos ceñiremos al acoplamiento entre los movimientos electrónicos y los vibracionales de los núcleos.

Dado el número de electrones y de núcleos implicados en el sistema, la situación resulta bastante compleja. Por eso se acostumbra introducir la aproximación del campo autocompatible. En el marco de ésta, el electrón *i*-ésimo se mueve en un campo de potencial efectivo creado por todos los electrones y los núcleos restantes. Pero tal constructo no basta. Precisamos introducir la aproximación de Born-Oppenheimer (B-O).

El origen de la aproximación de B-O reside en la diferencia de masas entre los electrones y los núcleos. El cociente entre la masa del protón (M) y la masa del electrón (m) nos ofrece un valor por encima de 1830. Cabe, pues, suponer los movimientos nucleares como "congelados", dada su lentitud. (Los núcleos proporcionan, a efectos prácticos, un campo de potencial promedio.)

Sea, por ejemplo, el ion complejo MnF_6^{2-}, que presenta 15 grados de libertad vibracionales. Para todos los estados electrónicos permitidos del sistema podemos asociarle una superficie de energía potencial; ese parámetro será función de las coordenadas nucleares.

Puesto que las vibraciones nucleares son pequeñas con respecto a la configuración nuclear de equilibrio, conviene intentar una descripción de los desplazamientos nucleares por serie de potencias.

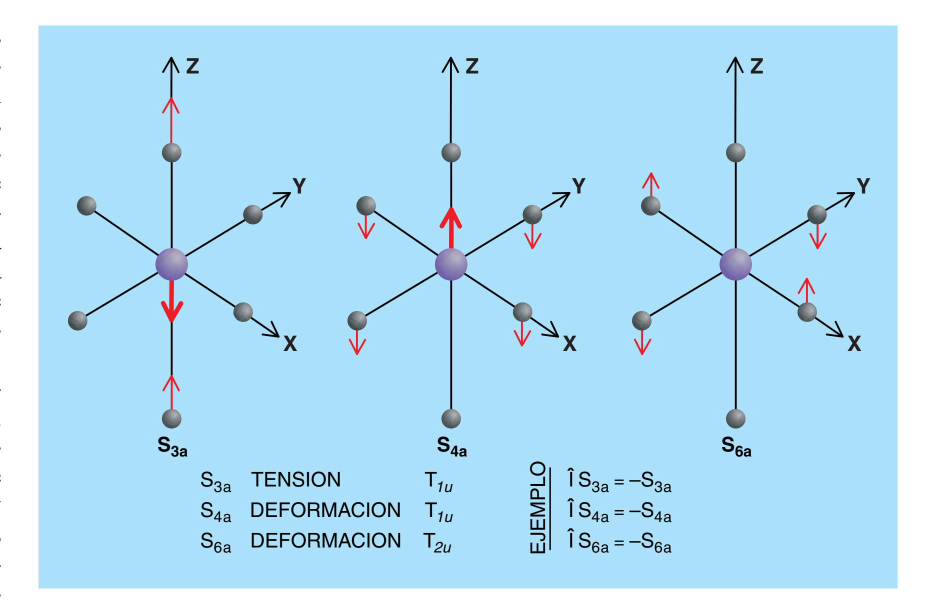
7. OPERACION DE INVERSION Y SU EFECTO. Las combinaciones de coordenadas internas del tipo tensión de los enlaces R_{jk} y deformaciones de los ángulos de enlace $R_0\alpha_{jkm}$ nos conducen a coordenadas de simetría. Las combinaciones para una estructura de este tipo se dividen en dos categorías: simétricas y antisimétricas con respecto a la inversión.

ROBERTO ACEVEDO

A todos estos estados electrónicos permitidos les corresponde una superficie de energía potencial. En la aproximación más simple, los estados permitidos del sistema pueden describirse como productos de funciones electrónicas, vibracionales y rotacionales. La estructura rotacional aparece inmersa en la envoltura electrónico-vibracional de cada pico de las imágenes digitalizadas o espectros.

Llegamos así a la escueta aproximación de Born-Oppenheimer, donde los estados permitidos de orden cero son productos simples de unas funciones: electrónicas (t) y vibracional (t,v_t), ambas referidas a una configuración nuclear de equilibrio; los símbolos t y v_t designan los estados electrónicos y vibracionales. A cada uno de los estados electrónicos le corresponde una superficie de energía potencial.

La mecánica cuántica nos enseña que estos símbolos están cuantizados. Significa ello que $t = 0, 1, 2, 3$, etcétera, y $v_t = 0, 1, 2, 3$, etc. En consecuencia, el estado electrónico fundamental, o de menor energía, presenta un conjunto infinito de estados asociados del tipo (0,0), (0,1), (0,2), etc. De esta forma, el primer estado excitado, $t = 1$, tendrá asociado los estados (1,0), (1,1), (1,2), y así sucesivamente.



8. COMPONENTE A LO LARGO DEL EJE +Z para las coordenadas de simetría impares en una molécula de tipo octaédrica. Si consideramos las coordenadas internas como base, resulta obvio proyectar las coordenadas internas en términos de desplazamientos cartesianos nucleares (X_L, Y_L, Z_L), donde L = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Una situación interesante ocurre para un sistema de siete núcleos, donde el número de grados de libertad vibracionales es $q_v = (3 \times 7 - 6) = 15$. Existirán, por tanto, un total de 15 combinaciones linealmente independientes. Consideremos las coordenadas de simetría impares frente a la operación de simetría correspondiente a la inversión. Cuando se aplica el operador sobre tales combinaciones lineales, éstas c ambian de signo. En la figura se muestra una de las componentes para cada una de las coordenadas de simetría impares.

ROBERTO ACEVEDO

Acoplamiento electrónico-vibracional

Si, con fines inquisitivos, perturbamos el sistema haciendo incidir luz sobre éste, se producirá una interacción entre la radiación y la materia. En general, las longitudes de onda de la radiación absorbida por la muestra, sistema atómico o molecular, es algunos órdenes de magnitud mayor que las dimensiones moleculares. Esta simple observación nos revela que, cuando se considera explícitamente la interacción radiación-materia, aparece una expansión en una serie. Esta, en una aproximación de orden uno, contiene una suma de dos términos, uno de los cuales corresponde al proceso de absorción y el otro término representa la emisión de luz.

Si interviene sólo un fotón, hablaremos de procesos monofotónicos. Existen, sin embargo, otros términos que aparecen en la expansión en serie, producto de la interacción entre la radiación y la materia. Tales términos, que portan asociadas probabilidades de ocurrencia menores, corresponden a la absorción simultánea de dos fotones, a la emisión simultánea de dos fotones y a situaciones similares.

Los procesos donde intervienen dos fotones presentan una probabilidad de ocurrencia menor. Si utilizamos, por ejemplo, radiación láser, los procesos se detectarán en las regiones del visible y del ultravioleta; en cambio, los procesos son prácticamente despreciables en la región del infrarrojo.

Por último, aparecen otros términos en esta expansión. Corresponden a situaciones en que un fotón se emite y el otro se absorbe al mismo tiempo. En estos procesos de dos fotones la diferencia de energías entre uno y otro es exactamente igual a la energía de un nivel vibracional; se produce entonces el efecto Raman.

Importa abordar ahora el concepto de transición electrónica y el mecanismo vibrónico (es decir, electrónico-vibracional) propio de sistemas de simetría cúbica, que presentan centro de inversión. Nos hallamos ante modos de vibración nucleares pares o impares frente a esta operación de simetría.

De acuerdo con la mecánica cuántica, si se satisface la condición de resonancia, es decir, si la diferencia de energías entre los estados permitidos es exactamente igual al producto de la constante de Planck y la frecuencia de la radiación, habrá una probabilidad no nula de que una fracción del conjunto de moléculas constituyentes del sistema acceda al estado excitado superior, con absorción de energía del campo de radiación. Existirá, pues, una probabilidad de transición por unidad de tiempo, que hemos de calcular para conocer los factores de origen electró-

nico y vibracional que determinan los aspectos mecanísticos propios de las excitaciones electrónicas. Existe también el proceso inverso de emisión: liberación de fotones al campo de radiación.

Cuando en el proceso de desintegración el sistema emite calor al cristal anfitrión, se originan los procesos no radiativos. Estos procesos radiativos y no radiativos son complementarios entre sí.

En transiciones radiativas, y considerando exclusivamente el término de orden uno de la expansión multipolar, es decir, el operador de momento dipolar eléctrico, nos encontramos con una expresión general de la teoría, según la cual se satisface la condición de resonancia. La probabilidad de transición por unidad de tiempo es directamente proporcional al cuadrado del módulo del momento de transición (regla de oro de Fermi).

Para excitaciones típicas, permitidas por reglas de selección estáticas (aproximación de orden cero), la información experimental nos indica que el orden de magnitud, entre momentos de transición del tipo dipolo eléctrico, dipolo magnético y cuadrupolo magnético, sigue la tendencia $10^0:10^{-5}:10^{-6}$, respectivamente. Para entender los mecanismos de intensidades espectrales en sistemas moleculares hemos de apoyarnos en las reglas de selección.

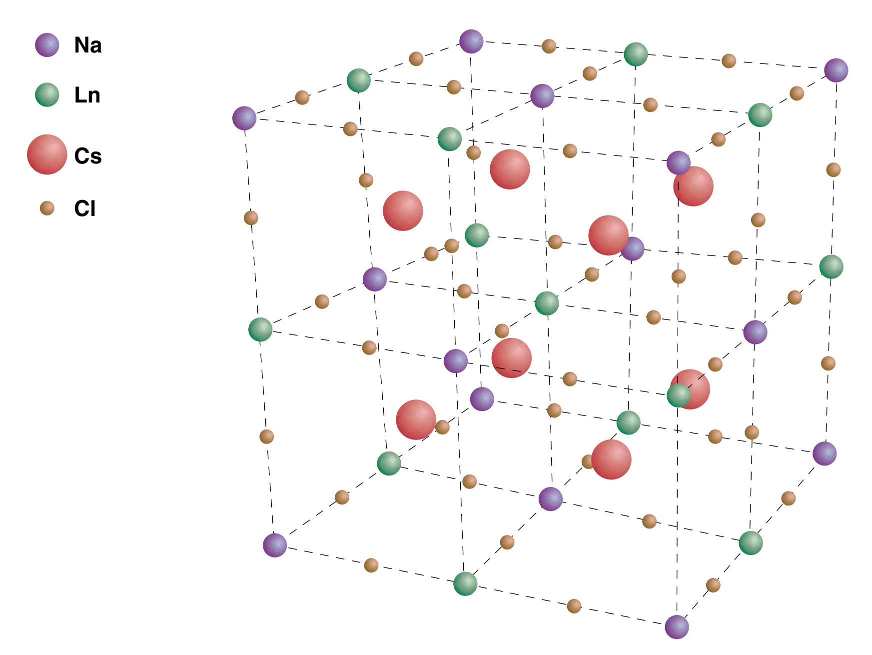
El operador dipolar eléctrico es impar frente a la inversión en entornos de simetría cúbica. En este sentido, las componentes del momento dipolar a lo largo de los tres ejes cartesianos sólo pueden conectar estados de distinta paridad. En su defecto, la suma de las variables resultará nula. Nos basta este ejemplo para comprender que las reglas de selección surgen de criterios matemáticos y del entorno cúbico o no cúbico del que estamos hablando.

En síntesis, la suma de las restricciones matemáticas y físicas nos conduce a las reglas de selección. Sea el caso de entornos cúbicos: si en orden cero el momento de transición dipolar eléctrico es nulo, entonces la excitación (vía mecanismo del tipo dipolo eléctrico) resulta prohibida por paridad (reglas de selección de Lapporte).

Nos interesa abordar las transiciones electrónicas, prohibidas por paridad, cuya intensidad admite explicación mediante un mecanismo vibrónico. En esta situación la intensidad espectral se explica, en orden uno, por medio de un mecanismo del tipo dipolo eléctrico (que conecta estados de distinta paridad) con la cooperación de modos normales de vibración impares frente a la inversión. Por tanto, en entornos cúbicos, las componentes *X*, *Y* y *Z* del momento dipolar eléctrico pueden, en principio, conectar estados de paridad opuesta.

Para dar cuenta de la función que desempeñan los modos normales fijémonos en una transición electrónica donde se conecten estados permitidos caracterizados por valores iguales del número cuántico secundario o azimutal (l). Esta situación ocurre entre estados permitidos de tipo: $p(l = 1)$, $d(l = 2)$, $f(l = 3)$, etc. De esta forma, los orbitales atómicos caracterizados por un valor del número cuántico azimutal impar cambian de signo frente a la inversión (–); en cambio, para orbitales atómicos con valores de l pares, permanecen invariantes frente a la inversión (+).

Sea una excitación electrónica entre dos orbitales caracterizados por $l = 3$; ambos orbitales son, pues, impares frente a la inversión. Al expandir en serie de potencias del campo eléctrico, que caracteriza al campo de radiación, el término de orden uno corresponde al operador de momento dipolar eléctrico. Se trata, en consecuencia, de un operador de orden uno, impar también frente a la inversión. Intentemos conectar los estados de tipo *f* mediante el operador de momento dipolar eléctrico. Veamos primero el orden cero: resultará $(-|-|-)$. Condición que indica un valor cero para esa interacción de estados impares conectados por un operador, también impar frente a la inversión. En el caso de una transición entre dos orbitales de tipo *d*, representaremos la interacción con la denotación $(+|-|+)$;



9. CELDA UNITARIA PARA UNA ESTRUCTURA DEL TIPO ELPASOLITA. La estructura tridimensional corresponde a un cubo de volumen a_0. Los electrones responsables de la intensidad observada en los espectros corresponden a transiciones entre orbitales del tipo $f(l = 3)$. Considerando que para el caso particular de $X = 1$, se obtiene la elpasolita pura Cs_2NaLnZ_6, los iones trivalentes representados por Ln se encuentran directamente coordinados con seis iones halogenuros en un entorno perfectamente cúbico; en consecuencia resulta evidente hablar de transiciones electrónicas asistidas por medio de un mecanismo vibrónico.

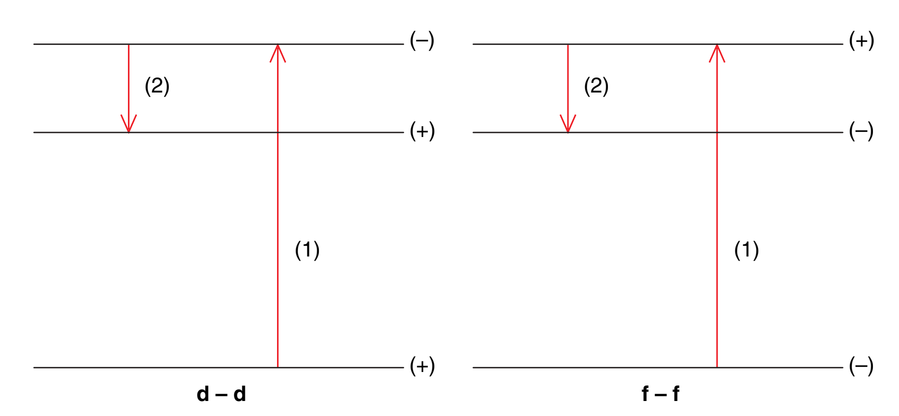
ROBERTO ACEVEDO

dicha interacción será, pues, nula por paridad. Estos resultados en particular ilustran la regla de selección estática de orden cero de Lapporte; en razón de la misma, en orden cero, la probabilidad de una excitación entre dos estados de igual paridad en un entorno cúbico es cero.

De ello se infiere que, en orden cero, no es posible explicar los espectros de absorción o de emisión asociados a sistemas cúbicos. Hay que avanzar hacia una aproximación de orden uno. Para este tipo de mecanismos la situación se torna más interesante. Se aplican sumas de cadenas. Las transiciones entre orbitales de tipo *d* se asignan a sumas del tipo (+│–│–)(–│–│+) + + (+│–│–)(–│–│+), en cuyo proceso participan dos operadores de paridad distinta de la paridad que muestran los orbitales atómicos implicados en la transición. Los operadores involucrados son el de momento dipolar eléctrico y el gradiente de la energía potencial con respecto de los modos normales impares de vibración de los núcleos constituyentes del sistema. Podemos imaginar una situación semejante para transiciones entre dos orbitales *f*.

De las cadenas de paridad se extraen conclusiones importantes. En sistemas centrosimétricos, donde la inversión constituye una operación de simetría, y en una aproximación de orden cero (excluida la vibración de los núcleos), el momento de transición de origen dipolar eléctrico se anula por razones de paridad. La situación es distinta en orden uno, por cuanto la teoría nos permite utilizar correcciones a las funciones de ondas en la aproximación adiabática (B-O) e incorporar los gradientes de la energía potencial con respecto a los modos normales impares de vibración del sistema en estudio.

Las correcciones de orden uno con respecto de las funciones de ondas se obtienen construyendo estados mezcla, en estricta conformidad con el principio de superposición de estados. Al utilizar una corrección de orden uno, por ejemplo, podemos escribir los estados permitidos pares mediante combinaciones del tipo $a(d) + b(p)$, donde los coeficientes a y b dependen paramétricamente de la energía del sistema y los estados $p(l = 1)$ corresponden a estados excitados, es decir, de mayor energía, y son impares frente a la inversión.



10. MECANISMO PROBABLE PARA UNA EXCITACION ELECTRONICA entre dos orbitales de tipo *d* y dos de tipo *f*. Para excitaciones entre orbitales del tipo *d*, los estados intermediarios son impares frente a la inversión; en cambio, para transiciones entre orbitales de tipo *f*, los intermediarios son pares frente a la inversión.

En resumen, las transiciones en entornos cúbicos prohibidas por paridad adquieren intensidad de transiciones virtuales entre estados de distinta paridad, con una corrección de orden uno en las funciones o estados permitidos y con la cooperación explícita de los modos normales de vibración impares.

Aplicaciones

De gran interés espectroscópico es el estudio de cristales del tipo elpasolitas. Se han estudiado en especial las del tipo $Cs_2NaLn_xLn'_{1-x}Z_6$, donde Ln y Ln' representan iones lantánidos trivalentes positivos y Z es un anión del tipo halogenuro (esencialmente fluoruro, cloruro y bromuro).

La información aportada por la representación de cargas tridimensional de estos cristales se obtiene a través de las técnicas de difracción de rayos X, difracción de rayos X de polvos y difracción de neutrones. Si atendemos a la estructura tridimensional de una celda unitaria de un cristal elpasolita, observamos que los electrones responsables de la intensidad observada en los espectros corresponden a transiciones entre orbitales del tipo $f(l = 3)$. Para el caso particular de $X = 1$, se obtiene la elpasolita pura Cs_2NaLnZ_6; los iones trivalentes representados por Ln se encuentran directamente coordinados con seis iones halogenuros en un entorno cúbico. Se manifiestan, pues, las transiciones electrónicas asistidas por medio de un mecanismo vibrónico.

Varios grupos de investigación han acometido diversas aplicaciones a sistemas cúbicos con transiciones entre estados del tipo *d* o entre estados del tipo *f*. En nuestro caso particular, estamos interesados en la síntesis, caracterización estructural, caracterización espectroscópica y búsqueda de aplicaciones técnicas de estos materiales y de otros de las formas $Cs_2NaLn_xLn'_{1-x}Z_6Cs_2NaLnZ_6{:}Ln'Z_6$ y LnA_3.

Bibliografía complementaria

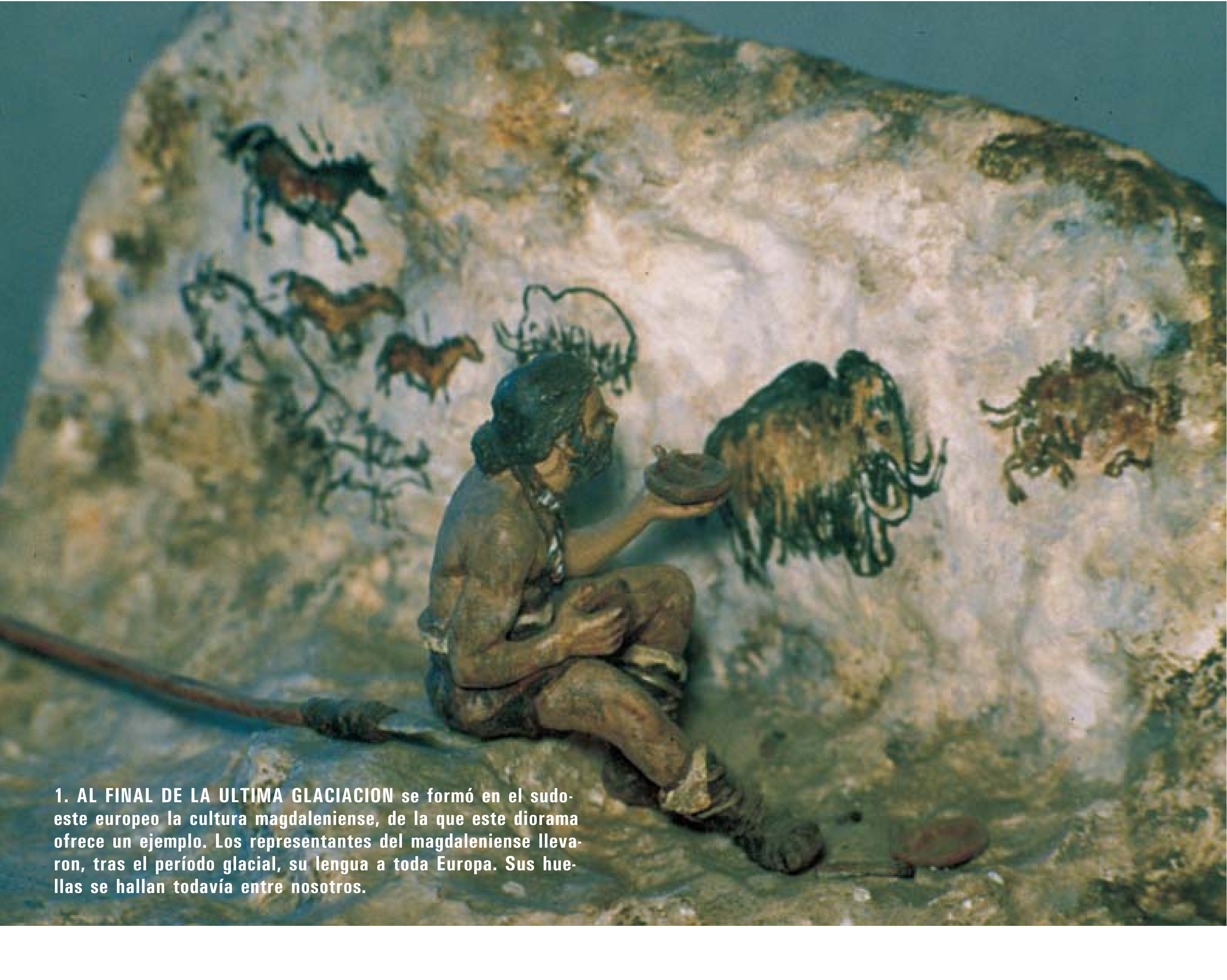
MOLECULAR ELECTRONIC STRUCTURES OF TRANSITION METAL COMPLEXES. C. J. Ballahausen. McGraw-Hill, Inc., 1979.

SYMMETRY PRINCIPLES AND MAGNETIC SYMMETRY IN SOLID STATE PHYSICS. S. J. Joshua. IOP. Publishing Ltd., 1991.

ATOMOS Y MOLÉCULAS. R. Acevedo. Editorial Cyvitas Comunicaciones. Santiago-Chile, 1996.

ELEMENTOS INTRODUCTORIOS EN ESPECTROSCOPÍA ATÓMICA Y MOLECULAR. APLICACIONES A SISTEMAS DE INTERÉS ESPECTROSCÓPICO. R. Acevedo. Red Internacional del Libro, Santiago-Chile, 2000.

ROBERTO ACEVEDO



1. AL FINAL DE LA ULTIMA GLACIACION se formó en el sudoeste europeo la cultura magdaleniense, de la que este diorama ofrece un ejemplo. Los representantes del magdaleniense llevaron, tras el período glacial, su lengua a toda Europa. Sus huellas se hallan todavía entre nosotros.

La lengua originaria de los europeos prehistóricos

En muchos topónimos y nombres de ríos europeos se agazapan palabras emparentadas con el vasco. Estos nombres se pusieron poco después de la última glaciación. Aun hoy todos los europeos están estrechamente emparentados con los vascos, un pueblo preindoeuropeo. Lingüistas y genéticos dan cuenta aquí del estado actual de esta teoría

El vascón fue la lengua originaria del continente

Elisabeth Hamel y Theo Vennemann

Ebersberg es un pueblo pintoresco prealpino, a orillas del río Ebrach. Tras esa villa de la región de la Alta Baviera se extiende una amplia zona de bosques. Resultaría, pues, inmediato, para un alemán contemporáneo, inferir que el lugar debe su nombre a la abundancia de caza mayor: "Monte del jabalí" (de *Eber*, jabalí, y *Berg*, montaña). De hecho, en su escudo figura un macho de prominente colmillo.

Pero ese sentido que hoy se le da al topónimo carece de fundamento. La designación no procede de la Edad Media, ni tampoco de la época celta. Arranca, presumiblemente, de los vascones, quienes, partiendo de los Pirineos occidentales, poblaron esta región poco después de la última glaciación.

Muchos nombres de asentamientos, ríos, montañas, valles y paisajes de Europa tendrían su origen en lenguas preindoeuropeas. Según la investigación reciente, predominan las relaciones y conexiones con el vasco. Se confirma así la opinión de que pueblos emparentados con los vascos habitaron, en otros tiempos, casi toda Europa. Eran éstos los vascones —para seguir la designación latina de los vascos en la antigüedad.

El estudio genético (*véase el apartado* "Tres cuartos de nuestros genes proceden de los primigenios vascos"), independiente de las investigaciones lingüísticas, ha llegado a idéntico resultado. Por tanto, los actuales vascos no son, en absoluto, un grupo biológico singular y marginal, sin parentesco relevante con el resto de los europeos. Muy al contrario, su genotipo se halla, en un grado sorprendente, en el conjunto de la población europea. No caemos en la exageración si afirmamos que los europeos somos todos vascos.

Estas conclusiones de las investigaciones contradicen las interpretaciones anteriores de los modelos de colonización en la Europa de los últimos 10.000 a 15.000 años, es decir, desde la última glaciación, cuyo postremo apogeo tuvo lugar hace unos 20.000 años. Muchos fueron los empeños por explicar cuál era el origen de los europeos actuales y de sus lenguas. En todos ellos los vascos ocupaban siempre una posición singular.

Al no ser indoeuropea su lengua, se hicieron las más diversas conjeturas sobre su origen y también sobre si son autóctonos o si habían llegado, por tierra o por mar, de otras zonas. Los científicos no veían ningún parentesco con el resto de los europeos. Pues, según el parecer hasta ahora vigente, los europeos, en su mayoría, descenderían de grupos que inmigraron hace como mucho 10.000 años, procedentes de Asia Central o del Próximo Oriente, y que trajeron consigo la agricultura y las lenguas indoeuropeas. Se creía que los indoeuropeos, mucho más numerosos, habrían desplazado o absorbido a los autóctonos.

Los lingüistas reconocían, ya en el siglo XIX, que los nombres de muchos ríos, arroyos y lagos de Alemania debían ser muy antiguos. Con anterioridad se había sugerido, además, que los primeros habitantes daban a los accidentes geográficos una mera designación topográfica, como "río", "montaña", "agua"; los nombres, por tanto, no vendrían a significar otra cosa que lo designado. En esa línea de razonamiento, los pueblos que llegaron después adoptaron estos nombres, aunque no entendieran su significado. Sin embargo, resulta difícil determinar, en cada caso, de cuál de los antiguos estratos procede el núcleo de los nombres actuales.

Los nombres de los asentamientos, por el contrario, pasan por ser mucho más recientes. Algunos autores sostienen que nacieron, en su mayoría, entrado ya el período histórico; varios lo harían en la Edad Media.

En el caso de nombres de ríos y otros accidentes geográficos rige la regla según la cual su antigüedad corre paralela a su frecuencia. Llama la atención que, a lo largo y ancho de Europa, abunden los nombres, precisamente de lugares relacionados con el agua, que comparten una misma raíz léxica. Es frecuente encontrar nombres que empiezan por *al-/alm-*, por ejemplo, *Aller*, *Alm* o incluso *Elz*, que antes se llamaba *Alantia*. Otro grupo lo forman los nombres en *var-/ver-*, como *Werre* o *Warne*. Abundan también los nombres en *sal-/salm-*, entre los que se numera, entre otros muchos, *Saale*. La investigación reciente ha sacado a la luz la existencia de un grupo nutrido de nombres en *is-/eis-*, tales como *Isar* y *Eisack*, y nombres en *ur-/aur-*, como *Urach* y *Aurach*.

Algo parecido vale para muchos topónimos. El nomenclátor de correos de Alemania recoge siete municipios *Ebersberg*, nueve *Ebersdorf* y dieciséis *Ebersbach*. En total figuran ochenta poblaciones que empiezan por la partícula *eber-*, desde *Eberan* a *Ebertsheim*.

Fósiles léxicos que perviven

En Francia se cuentan por docenas los lugares cuyos nombres tienen también ese elemento componente. Al hallarse en otro espacio lingüístico-fonético, desde Alemania suenan algo distintos. Pero Ebréon, Ibarolle, Evrune, Ivry, Averdon, Avricourt, Avrolle, Yvré y otros muchos pueden relacionarse con la misma raíz. Es obvio que ningún francés asociaría los nombres de estos pueblos con el jabalí, al que llaman *sanglier*.

A mediados del siglo pasado advirtieron algunos, en particular el indoeuropeísta Hans Krahe (1898-1965), que los nombres de los asentamientos transalpinos hasta Gran Bretaña y el sur de Escandinavia mostraban una impronta sorprendentemente homogénea. Krahe denominó a estos nombres "fósiles [...] de un tiempo pasado y, en muchos casos, muy remoto", cuyos orígenes buscó en lenguas indoeuropeas de la antigüedad.

Pero estos intentos de explicación no solían resultar satisfactorios. Por otra parte, los indogermanos (o in-

Nombres prehistóricos de corrientes de agua en Europa

Testimonios de nuestro pasado lingüístico

De "diamantes en bruto" calificó el germanista y americanista alemán Ernst Förstemann (1822-1906) los nombres antiguos de ríos cuando, a mediados del siglo XIX, investigaba las denominaciones geográficas.

Al río Ebro los romanos lo llamaron *Iberus*. Atraviesa una zona que en tiempo de los romanos todavía hablaba vasco. Los lingüistas dan por cierto que el nombre viene del vasco; la palabra vasca *ibai* significa "río", e *ibara* quiere decir "campo junto al río, valle".

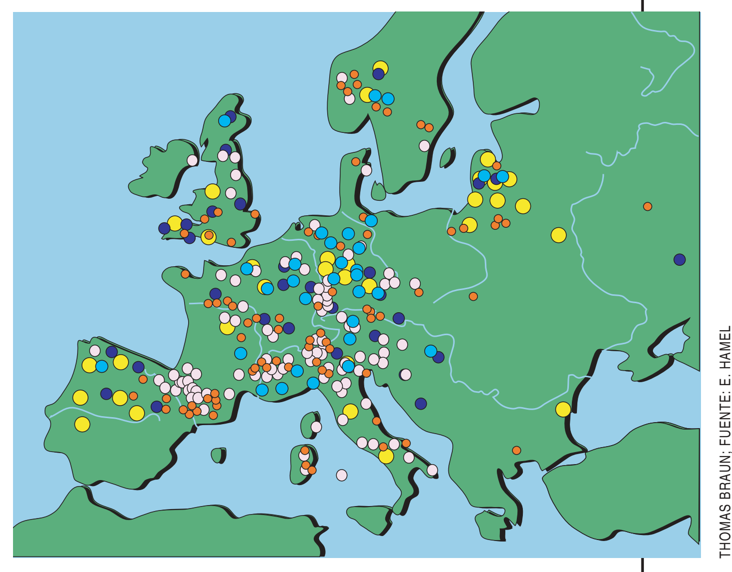
Ahora bien, ¿a qué obedece que otros muchos ríos europeos porten nombres similares? En Montenegro y Serbia corre el *Ibar* hacia la Moravia occidental; en el sur de Alemania hay dos ríos *Ebrach* y muchos Eberbäche, y en Oberaula en Hessen un *Ibra*. En el nombre del río austríaco *Ybbs* (antes *Ibisa*), afluente del Danubio, al que se une en la ciudad de Ybbs, se esconde quizás una variante lejana del vasco *ibai* "río", a saber *ibaso*, que también significa "río".

Abundan los ríos europeos cuya denominación se reduce a un corto número de palabras o sílabas. Una de éstas es la partícula *is* (se encuentra también como *eis*), que aparece en más de 200 nombres de cursos de agua desde Noruega hasta Italia, desde España hasta remotas zonas de Rusia; por citar algunos: *Iselfjorden* en Noruega, *Isa* en Italia, *Isainka* en Rusia, *Iesla* en Lituania, *Jizera* en Chequia e *Ijssel* en los Países Bajos. El elemento vasco *is* (pronunciado con *s* sonora) significa "agua, corriente de agua".

Con pareja frecuencia y amplia distribución hallamos nombres asociados al agua que portan los elementos *ur* (*aur*), *var* (*ver*), *sal* (*salm*) o *al* (*alm*). *Ur* significa "agua", *ura* "el agua, el torrente". Se postula significados similares para *al* y *sal*. En conjunto, muestran la probable expansión del vascón en otros tiempos.

Citemos algunos ejemplos, entre muchos, de los nombres en *ur-*: *Urula* (Noruega); *Irwell* (Gran Bretaña); *Ourthe* (Bélgica); *Auerbach*, *Urbach*, *Urach*, *Aurach* (Alemania); *Irrsee* (Austria); *Aroffe* (antes *Urofia*), *Huriel* (Francia); *Urura*, *Urola* (España); *Urwis* (Polonia); *Ura* (Rusia). Bajo la variante de los nombres en *var-* se hallan, por ejemplo, en Alemania: *Warne*, *Werre*, *Warmenau*, *Warme Aue*; bajo la variante *sal-*: *Saale*, *Sale*, *Salz* (Salusia), *Selke* (Salica); bajo *al-*: *Aller*, *Alm*, *Alme* por dos veces (*Almana* y *Almara*), *Ahla*, *Elke* (Alantia), *Elz*. En la península Ibérica hay ríos con nombres como *Alba*, *Alenza*, *Almar*, *Almanza*, *Almonte*, *Almantes*. Los listados se podrían alargar.

Un número de asentamientos y poblaciones podrían derivarse de estos y otros componentes lingüísticos prehistóricos de Europa. Creemos que se referían originariamente a cursos de agua o a otros lugares naturales ya denominados. Muchos de los antiguos nombres geográficos fueron en un principio el nombre común del accidente del relieve o de otra estructura natural.



THOMAS BRAUN; FUENTE: E. HAMEL

Nombres con *Al-/Alm-* · Nombres con *Var-/Ver-* · Nombres con *Is-* · Nombres con *Sal-/Salm-* · Nombres con *Ur-*

EN ESTE MAPA se sitúan corrientes de agua que incluyen en su nombre alguno de los cinco elementos lingüísticos mencionados.

doeuropeos, según la nomenclatura internacional) hicieron su aparición relativamente tarde. Para el arqueólogo Colin Renfrew, se identificarían con los primeros agricultores europeos, con los que se inició el Neolítico.

Si se acepta que los nombres de arroyos y de otros accidentes geográficos proceden de pueblos antiguos ya desaparecidos, entonces en Europa se deberían tener en cuenta también las comunidades que aparecieron justo después de la última glaciación. Los agricultores llegaron a Europa central hace unos 7000 años. Pero mucho antes se habían vuelto a poblar las zonas que en la última glaciación eran inhóspitas. Los arqueólogos fijan el asentamiento estable conocido más antiguo tras el apogeo de la última glaciación. Se trata de un enclave de la región de Friburgo, la Toscana alemana, cuya antigüedad se cifra en más de 18.000 años. A buen seguro, estos grupos, los europeos prehistóricos, habían puesto nombre a los ríos y lugares de su entorno. Por eso no se puede excluir que muchos nombres propios se remonten a época tan temprana. Incluso en nuestros tiempos se ha podido constatar en muchos casos cómo grupos humanos inmigrantes, en las más diversas regiones del mundo, adoptaban los nombres de los nativos y, en el mejor de los casos, los alteraban un tanto adecuándolos a sus propias lenguas, aunque sin entender el sentido de la palabra.

Tampoco se aviene con la teoría de que fueron los indoeuropeos los que acuñaron los viejos nombres europeos de cursos de agua otro dato de observación: hay en España nombres de torrentes y ríos con los mismos componentes léxicos que en la Europa transalpina. Pero los indoeuropeos no llegaron a esa zona

del sudoeste europeo hasta el primer milenio antes de Cristo. Los lingüistas derivaban algunos de estos nombres ibéricos asociados al agua de palabras emparentadas con el vasco. Según la tesis que aquí presentamos, ésa debe ser también la interpretación de los nombres relativos a cursos de agua del resto de Europa. En el léxico vasco se hallan los componentes léxicos característicos (*is*, *ur* e *ibar*) que se agazapan en muchos nombres hidrográficos europeos. Todos ellos comparten un significado relacionado con el agua o su curso natural (*véase el recuadro* "Testimonios de nuestro pasado lingüístico").

Otra pista que apunta al vasco la ofrecen las vocales de estos nombres. Casi la mitad de los nombres véteroalemanes asociados al agua empiezan por vocal. La más frecuente es la *a* (en parte tan sólo en formas más antiguas del término); suele ser habitual que el nombre tenga otra *a*. En estos nombres asociados con el agua abundan, asimismo, la *i* y la *u*. Se trata de una observación que no se aprecia en el indoeuropeo antiguo, en el que escaseaban las palabras empezadas por vocal y menudeaban las vocales *e* y *o*. En vasco, por el contrario, un elevado número de palabras empieza por *a* y muchas incluyen otra *a* (o más). Son también frecuentes las palabras iniciadas con *i* y *u*.

En la cátedra de germanística y lingüística teórica de Múnich hemos seguido esa misma línea en el estudio de los nombres de asentamientos y poblaciones. También aquí se puede establecer una relación con palabras o partículas léxicas vascas. Por lo que hasta ahora se ha comprobado, nos tropezamos una y otra vez con vocablos vascos para accidentes geográficos naturales, es decir, para palabras topográficas; sobre todo, cuando se trata de lugares asociados a emplazamientos ventajosos, que reflejan, cabe suponer, una gran antigüedad.

Aunque no siempre, suele darse que los nombres hidrográficos y de estructuras del paisaje se correspondan con una palabra antigua cuyo significado denote "agua, corriente de agua" o bien la forma del accidente topográfico. Volvamos al ejemplo de los nombres con *eber*-. Uno de los lugares franceses con *eber*-, Ibarolle, está en un valle pirenaico. Puesto que la palabra vasca *ibar* significa "valle, campo junto al río", entendemos por qué los lingüistas dieron ese mismo significado al topónimo.

El *Ebrach*, río que bordea la villa de Ebersberg, significa "río"; con mayor precisión, "río-río", pues el añadido algo más tardío *ach* es el término que utilizan los alemanes del sur para indicar el "río" (emparentado con el vocablo latino *aqua*). Creemos que el asentamiento se llamó así por el río (*véase la figura 2*). Así pues, muchos de los lugares con *eber*- habrían sido denominados de idéntica forma, hace milenios, por un pueblo que hablaba vascón. Se integró en los nombres el término dado al río o al paisaje.

Milenios más tarde, pueblos con otra lengua transformaron el nombre en una forma que tuviera sentido para ellos: del vasco *ibar* (mejor dicho, de la palabra con ella emparentada de una lengua vascona) salió después en alemán el componente *Eber* del nombre del río y de la población.

De forma análoga se pueden explicar, por una referencia a una corriente de agua, otros topónimos frecuentes. Por ejemplo, las múltiples denominaciones que incluyen la partícula vasca *is*. Esta sílaba, que se presenta en palabras compuestas, significa en vasco "agua o curso de agua". En Baviera, existen *Ismaning* (antes *Isamaninga*), *Isen* (en el *Isen*, antes *Isana*) y *Eisolzried* (antes *Isoltesried*) y en Suiza encontramos *Isen* e *Isel*.

Con todo, hemos descubierto también nombres que no se refieren a una corriente de agua. Los vascos tienen la palabra *aran*, que significa "valle". Topónimos con ese componente se distribuyen por toda Europa. En el sur de Inglaterra, por ejemplo, está la ciudad de Arundel, en Noruega (y también en Suecia)



2. EBERSBERG, población de la Alta Baviera, se llamaba en la Edad Media *Eberesperch* o también *Eparespere*. En el caso de que el núcleo del nombre, *eber*, proceda, como se supone, de una lengua prehistórica emparentada con el vasco y sonara originariamente *ibara*, *Ebersberg* no debería su denominación al jabalí macho de su escudo. Significaría "monte junto al río", el Ebrach que la bordea.

CORTESIA DE ALOIS FREUNDL; ESCUDO: CIUDAD DE EBERSBERG

Los autores

ELISABETH HAMEL trabaja en prehistoria y protohistoria en Múnich. THEO VENNEMANN es profesor de germanística y lingüística teórica en la Universidad Ludwig-Maximilian de Múnich; antes lo fue en la de California en Los Angeles. PETER FORSTER, que enseña en la Universidad de Cambridge, se doctoró en biología por la Universidad de Hamburgo.

hay una Arendal. En Alemania se cuentan por docenas los Arnach, Arnsberg, Arnstern, Arensburg, Ahrensburg. Podemos incluir aquí también a Ohrenbach en el Odenwald, que antes se llamó *Aranbach*, como también Mohrenstein en el Alto Palatinado, denominada precedentemente *Marstein* (en el *Arnstein*).

Según la tradición popular algunos de estos lugares deben su nombre a personajes, por ejemplo, a un tal *Arno*. Pero tal fenómeno suele ser harto raro; por lo general, las personas tomaban el nombre de su lugar de origen, y no al revés. Otros lugares en *Arn-* al parecer derivan su nombre de *Aar*, "noble" (en antiguo altoalemán *arn*).

Múnich (München) no es "donde viven los monjes" (Mönchen)

Los lugares en *Arn-* se encuentran siempre en zonas caracterizadas por valles, en coherencia con la palabra vasca *aran*. La ciudad del este holsaciano Ahrensfeld (cerca de Ahrensburg) está en el marco de un valle hundido, que hoy es un parque natural. Una vez más, la hipótesis más verosímil es pensar que tales asentamientos se denominaron así, antaño, por su topografía.

Otros topónimos encierran probablemente una antigüedad mucho mayor de lo que supone la etimología popular. Múnich (München) no significa "donde viven los monjes" (Mönchen), ni siquiera habrá sido una fundación cristiana. Su denominación original debió de ser *Munica*, "plataforma ribereña". La palabra vasca *mun* (otra forma algo más antigua es *bun*) significa "ribazo, declive, elevación del terreno". El proto-Múnich se asienta sobre la colina de Petersbergl, junto al río Isar. La forma más antigua del componente del nombre, *bun*, podría pervivir en el griego *bounó* ("cerro"), en griego clásico *bounós* ("colina"), que en opinión de los especialistas se trata de un préstamo.

De acuerdo con nuestra tesis, lo expresado indica que los europeos prehistóricos que pusieron estos nombres hablaban lenguas emparentadas con el vasco. Se trataría de comunidades que sobrevivieron al período glacial en alguno de los mayores refugios del sur de Europa y, al mismo tiempo, desarrollaron una lengua común. La única región apropiada para ello de la Europa occidental se halla en el sudoeste francés/noroeste español. En esa zona de refugio, la tierra vasca pirenaica, aún se habla vasco.

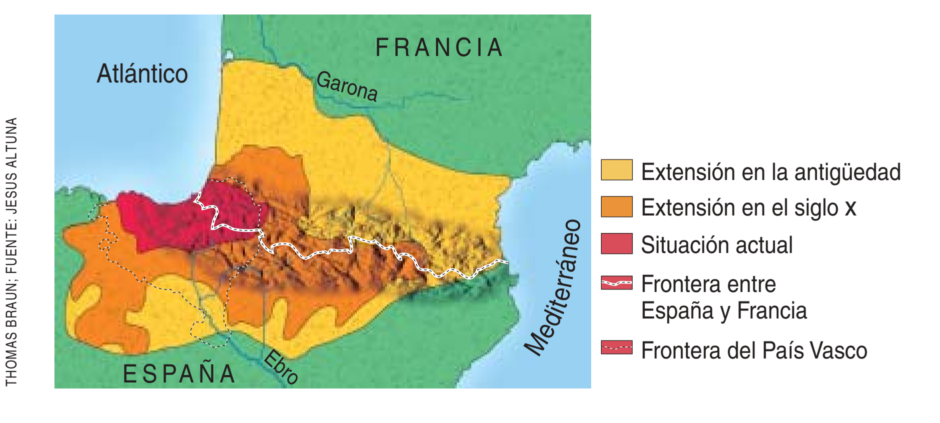
Los europeos vascones prehistóricos no sólo dejaron nombres geográficos. En más de una región se dan trazas de su antigua forma de contar. Los indoeuropeos trajeron el sistema decimal. Los vascos de nuestros días siguen contando en base veinte, es decir, "veinte", "veinte y diez" (por treinta), "dos veces veinte" (por cuarenta), "dos veces veinte y diez" (por cincuenta), "tres veces veinte", etc. Los celtas, un pueblo indoeuropeo, habrían tomado de los vascones el sistema vigesimal.

Este sistema se conservó en el francés antiguo hasta el 360 y aún perduran algunas reliquias: *quatre-vingts* (cuatro-veinte, por ochenta) *quatre-vingt-dix* (cuatro-veinte-diez, por noventa). El danés también conserva este viejo sistema de contar.

Desde una perspectiva totalmente distinta, la genética aborda el problema de la colonización en la Europa del período postglacial y, sorprendentemente, llega a unas conclusiones análogas. La genética molecular nos revela indicios de que la inmensa mayoría de los europeos actuales tiene antepasados que ya vivían en el continente durante el período glacial. Los investigadores descubrieron, asimismo, tal como ya se presumía por los resultados de los estudios lingüísticos, que la repoblación de la Europa occidental después de la glaciación partió principalmente del refugio situado en el norte de la península Ibérica/sudoeste francés (*véase el apartado* "Tres cuartos de nuestros genes proceden de los protovascos").

En la época histórica, los vascones ocupaban todavía un territorio mucho más extenso del que habitan hoy (*véase la figura 3*). Se extendían, por arriba, hasta la Gascuña (antes llamada *Vasconia*). Sin embargo, para los estudiosos los vascos seguían siendo un pueblo residual, que sólo había podido sobrevivir a los indoeuropeos gracias a la situación marginal de su espacio vital, aunque desde el punto de vista genético no difirieran de los demás pueblos europeos. El antropólogo y etnólogo austríaco Felix von Luschan (1854-1924), que rehusaba la división de la humanidad en razas de distintas procedencias, escribió en 1922: "Yo nunca hubiera estado en condiciones de reconocer como vasco ni siquiera a uno solo de vosotros".

Es probable que la lengua vascona empezara a formarse entre los grupos humanos que sobrevivieron a la glaciación en el sudoeste europeo, en una de las últimas zonas habitables en los Pirineos y al norte de los Alpes. Hace más de 18.000 años, cuando los glaciares, tras el apogeo de la última glaciación, comenza-



3. EXPANSION DEL VASCO. El vasco sólo se habla hoy en una pequeña zona del norte de España y del sudoeste de Francia. Pero en tiempo de los romanos esta lengua no indoeuropea se hallaba mucho más extendida. Es probable que, después de la glaciación, los humanos se comunicaran, en amplias regiones de Europa, mediante idiomas emparentados con el vasco.





4. LOS CAZADORES DEL MAGDALENIENSE, el más alto grado cultural del Paleolítico Superior en el oeste y centro de Europa, dejaron tras sí no sólo utensilios y obras de arte hechos de cuernos de reno y colmillos de mamut, sino también numerosos elementos lingüísticos.


JEAN-RENE CHATILLON

ron a fundirse, estas comunidades volvieron a desplazarse, poco a poco, hacia el norte y centro de Europa. Estas regiones habían permanecido prácticamente despobladas. Los recién llegados dieron, en su propia lengua, nombres topográficos a ríos, montes, valles y lagunas. Trajeron consigo la cultura del magdaleniense, que llevaron hacia el este hasta Moravia y Turingia.

En el norte de Alemania se desarrolló una civilización de cazadores de renos que se extendió hasta Pomerania e Islas Británicas. Todavía podemos identificar gran número de nombres de ríos en el este europeo que verosímilmente se remontan a variantes escindidas del vascón.

Hasta en el alemán cotidiano ha dejado huellas el vascón. *Land* es, según opiniones sostenidas ya hace años, un préstamo léxico del vascón, y también podrían figurar en este grupo *Harn*, *Schenkel*, *Garbe*, *Mure*, *Anger*, *Haken*, *Krapfen* ("garra, gancho") y *Senne*. Pero, en parte, estas palabras se transmitieron a través del latín. *Käse* (del vasco *gazi*, "salado") nos llegó desde el latín. La palabra latina *mons* ("monte") y *grandis* ("grande") podrían ser préstamos vascones. Incluso la antigua regla de que el acento debía recaer siempre en la primera sílaba de la palabra podría tener su origen en el vascón; ha afectado a todas las lenguas (y sólo a éstas) que desde el este llegaron al oeste: el germánico, el celta, el protolatín y el etrusco (no indoeuropeo).

Puede sorprender menos que se encuentren elementos vascos en el norte de Africa. Quizás atravesaron en ambos sentidos el estrecho de Gibraltar ya en épocas muy tempranas. Adviértase que, en el período glacial, la distancia entre las costas era mucho menor que hoy. En los últimos 40.000 años aparecieron paralelismos entre las culturas del sudoeste europeo y del norte de Africa.

En Marruecos hay parajes y ríos con nombres claramente vascones. Cierto dialecto bereber, el tajelhit, cuenta en sistema vigesimal; muchas narraciones de los bereberes se asemejan a los cuentos de Grimm. La piel clara y los ojos azules que, de cuando en cuando, se ven en algunas tribus bereberes podrían explicarse por el parentesco con los vascones. Estudios genéticos en Argelia muestran que al menos el 8 % de las líneas son típicamente europeas. Y, viceversa, existen en España líneas hereditarias bereberes.

Sin embargo, no son las lenguas vasconas las únicas no indoeuropeas que han dejado huella en Europa. Desde hace más de un siglo los filólogos descubren en Europa occidental influjos de lenguas camitosemíticas. Por lo visto, grupos que hablaban estas lenguas siguieron, en la época prehistórica, la costa mediterránea en su avance hacia el norte. La historia de las colonizaciones de Europa puede deparar todavía muchas sorpresas.

Tres cuartos de nuestros genes proceden de los protovascos

Elisabeth Hamel y Peter Forster

Hace unos 20 años Allan Wilson, genético molecular que trabajaba por entonces en la Universidad de California en Berkeley, se propuso comparar una región variable de ADN de personas vivas con el fin de establecer el árbol filogenético prehistórico de esta molécula de la herencia. La consecuencia más popular de su investigación ha sido la idea de que el hombre moderno, el *Homo sapiens*, apareció en Africa hace aproximadamente unos 130.000 años y que, desde allí, se propagó, a través del Próximo Oriente, por Asia, Europa y el resto del mundo, desplazando a formas humanas preexistentes como por ejemplo, a los neandertales en Europa [*véanse* "Base molecular de la evolución", diciembre de 1985, y "Origen africano reciente de los humanos", junio de 1992, de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA].

Pero estos análisis filogenéticos aportan también una explicación ajustada y precisa de las colonizaciones de algunas de las regiones del mundo. Esto vale asimismo para explicar la población de Europa, cuya historia después de la última glaciación se presenta en los últimos años de una forma sorprendentemente nueva.

Varios equipos de científicos investigan la filiación de los europeos en otras regiones parciales del genotipo. El principio rector es siempre el mismo: se registran las mutaciones que han tenido lugar a lo largo del tiempo en segmentos escogidos de ADN y que en sus secuencias representan líneas de descendencia. Después se reconstruye, a partir de las moléculas actuales de ADN, el árbol filogenético de las moléculas prehistóricas de ADN.

Este árbol filogenético del ADN equivale a un árbol genealógico, pero con dos diferencias importantes: en primer lugar, el árbol filogenético del ADN no es tan detallado como un árbol genealógico, ya que no necesariamente ocurre en cada generación y en cada rama una mutación significativa. En segundo lugar, el árbol filogenético del ADN se remonta hasta los inicios de la humanidad, hace unos 130.000 años, mucho más lejos que el mejor de los árboles genealógicos. Conocida la tasa de mutación, se puede calcular el momento cronológico de la aparición de cada uno de los antepasados reconstruidos en el árbol filogenético del ADN.

Entre los científicos que han contribuido al estudio sobre las colonizaciones europeas figuran Martin Richards, de la Universidad de Huddersfield, Antonio Torroni, de la de Pavía, y Hans-Jürgen Bandelt, de Hamburgo. Para obtener los resultados que aquí presentamos se comparó material hereditario de las mitocondrias; estos orgánulos citoplasmáticos poseen un genoma propio, distinto del encerrado en el núcleo. El ADN mitocondrial se transmite sólo a través de la madre (mientras que los cromosomas del núcleo proceden mitad de la madre y mitad del padre). Los resultados, obtenidos a partir de más de

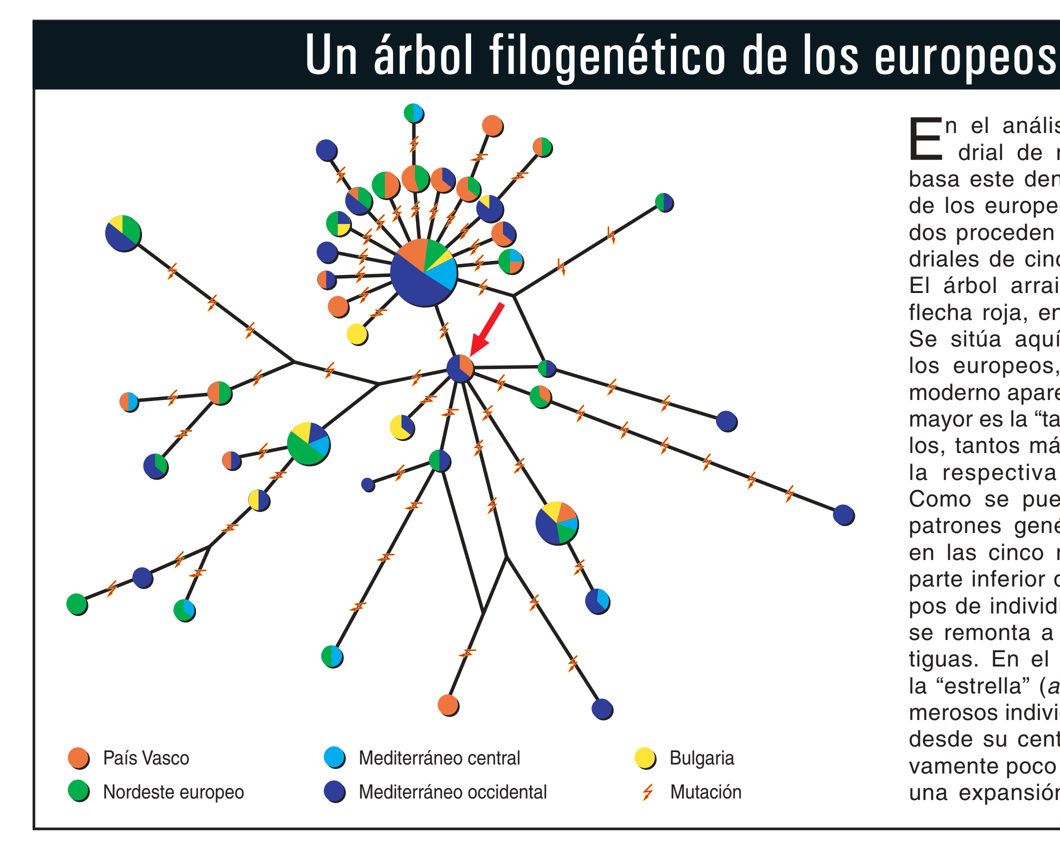
5. LA MAYORIA DE LOS EUROPEOS ACTUALES descienden de comunidades que durante la glaciación habitaban ya en el continente. Eran pueblos recolectores y cazadores. Del reno aprovechaban la carne, el cuero y la cornamenta para diversos fines (*cazador de la derecha*).





MICHEL PROUX Y HENRI BIDAULT

Un árbol filogenético de los europeos



En el análisis del ADN mitocondrial de muchos individuos se basa este dendrograma filogenético de los europeos. Los datos recabados proceden de genomas mitocondriales de cinco regiones europeas. El árbol arraiga en el lugar de la flecha roja, en el centro del gráfico. Se sitúa aquí el origen común de los europeos, a partir del hombre moderno aparecido en Africa. Cuanto mayor es la "tarta", es decir, los círculos, tantos más individuos muestran la respectiva secuencia de ADN. Como se puede ver, aparecen los patrones genéticos más frecuentes en las cinco regiones incluidas. La parte inferior del gráfico abarca grupos de individuos cuya ascendencia se remonta a expansiones más antiguas. En el dendrograma destaca la "estrella" (*arriba*), que agrupa numerosos individuos; ello significa que desde su centro surgió, hace relativamente poco (10.000-15.000 años), una expansión potente.

THOMAS BRAUN; FUENTE: M.B. RICHARDS ET AL.

10.000 europeos, dan información sobre las filiaciones genéticas maternas.

Los cálculos y evaluaciones dieron como resultado árboles filogenéticos con múltiples ramificaciones y bifurcaciones (*véase el recuadro* "Un árbol filogenético de los europeos"). En ellos se aprecia que los europeos actuales se distribuyen, respecto de la región de ADN estudiada, en un reducido número de tipos fundamentales (o patrones básicos), que aparecen cada vez en un número mayor de variantes o variedades.

Cuando desde un nudo del árbol filogenético salen, a modo de estrella, muchas ramas a la vez, ello significa que el número de pautas de mutación debe haber aumentado mucho en poco tiempo —que, por consiguiente, han debido aumentar rápidamente los portadores del patrón genético del nudo—. Deducimos, pues, qué tipos genéticos intervinieron en las expansiones de población (*véase como ejemplo de uno de estos árboles filogenéticos la "estrella" del recuadro* "Un árbol filogenético de los europeos").

En concreto, esto quiere decir que, con independencia de en qué parte de Europa viva una persona o de qué parte del continente procedieran sus antepasados más próximos por vía matrilineal, el algoritmo utilizado asigna el patrón hereditario estudiado de esa persona a un tipo de expansión. Individuos del mismo tipo básico pueden hallarse hoy en lugares muy diversos; pueden vivir muy desparramados por toda Europa. Un resultado interesante es saber con qué frecuencia se halla cada tipo en las diferentes zonas. Puesto que nuestro procedimiento de cálculo integra también en el árbol filogenético los patrones hereditarios de los descendientes y reconoce su antigüedad, podemos conocer, además, en determinados casos favorables, la propagación paulatina de cada tipo genético por Europa.

En nuestros datos hemos incluido también patrones genéticos de personas no europeas y, en particular, del Próximo Oriente y del norte de Africa. Gracias a ello, nos es dado conocer de dónde procede cada uno de los patrones básicos europeos y cuál es su antigüedad.

En concreto, nuestro resultado más importante ha sido llegar a la conclusión de que, al menos, tres cuartos de los europeos actuales procede, por vía matrilineal, directamente de los europeos prehistóricos que vinieron, ya antes del apogeo de la última glaciación, es decir, hace más de 20.000 años, del Próximo Oriente. Según nuestros datos, los tipos europeos más antiguos debieron originarse en el sur del Asia occidental hace unos 50.000-80.000 años.

> El escritor alemán Kurt Tucholsky (1890-1935) relata en *Ein Pyrenäenbuch* [Un libro de los Pirineos]:
>
> *"Un conde de Montmorency ponderaba una vez, delante de un vasco, la antigüedad de su nombre, de su linaje, de su familia; se vanagloriaba de cuán grandes hombres descendía él. El vasco le contestó: Señor conde, nosotros los vascos, ¡no descendemos!".*

Parece evidente que todos ellos proceden de líneas del moderno *Homo sapiens*. No derivan, por tanto, ni de los neandertales ni de otros.

Presumiblemente, los europeos sólo pudieron sobrevivir al frío glacial refugiándose en las zonas donde el clima era algo más benigno; de ellas, las dos más notables estaban una en Ucrania y otra en el sudoeste europeo. Como hemos mostrado, una parte considerable de los grupos que volvieron a poblar el oeste y norte del continente después de la glaciación (según la datación genética, hace unos 10.000-15.000 años) procedían del sudoeste de Europa, pues los vascos y el resto de los europeos se diferencian genéticamente en sólo un 25 %. Esto quiere decir que, contra lo que se solía afirmar, los grupos que inmigraron después, en el Neolítico, aportaron relativamente poco a la población europea.

Ofrecen especial interés los resultados sobre dos de los tipos genéticos básicos del genoma mitocondrial que nosotros denominamos versión (o tipo) "H" y versión (o tipo) "V". Para simplificar, se podría leer "H" como "versión principal", pues alrededor del 40 % de los europeos presenta este tipo. Se halla firmemente establecido que este tipo ya estaba presente en Europa durante la última glaciación.

"V" puede usarse libremente aquí como "vascones", pues apunta a la expansión de las comunidades, después de la última glaciación, desde la zona de refugio glacial situada en el norte de España/sur de Francia (como también algunas otras líneas). El recuadro titulado "Expansión de los europeos prehistóricos" ilustra de qué modo se propagó antaño este tipo "V" y su distribución actual entre la población europea.

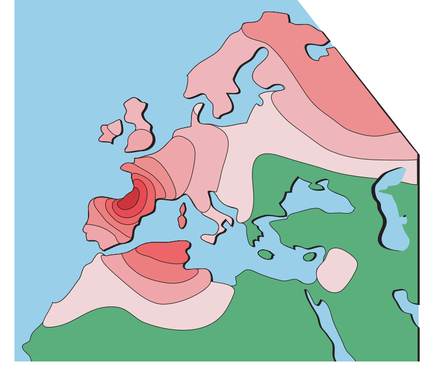
Vale la pena resaltar que ni siquiera un cuarto de los europeos de hoy tiene, a la vista de los datos, antepasados en la línea femenina de los que vinieron al continente no antes de 10.000 años. De estos inmigrantes, que presumiblemente fueron los primeros agricultores y ganaderos en Europa, reconocemos varias oleadas, entiéndase varias líneas genéticas de antigüedades diversas. Así se destaca una línea de 10.000 años de antigüedad en Europa occidental y otra de 6000 años en Europa central. Según las teorías más recientes, los primeros agricultores llegaron a Europa por las costas mediterráneas y atlánticas —algo que la investigación lingüística también permite suponer.

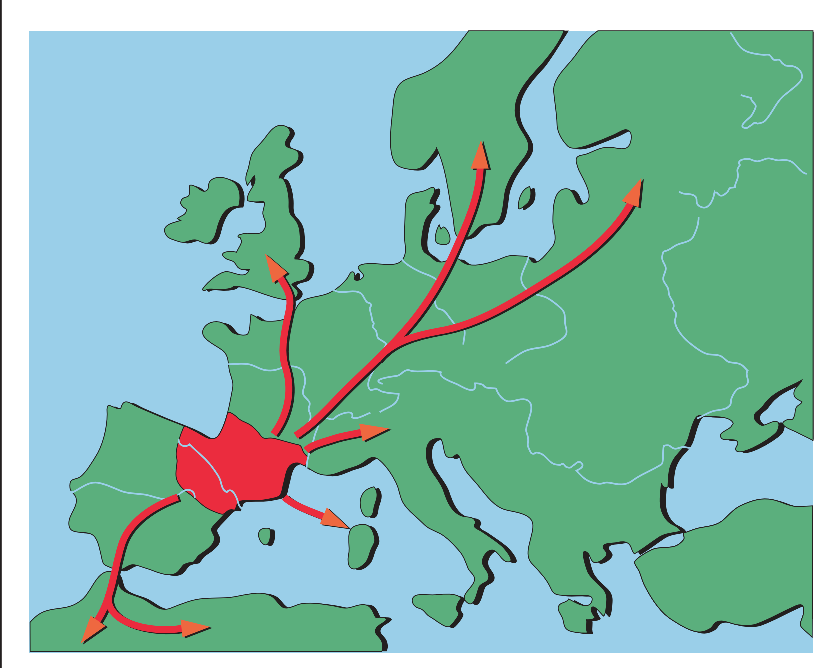
Nuestros estudios del genoma mitocondrial sólo informan sobre la descendencia matrilíneal. Podría ello significar que las mujeres determinaran,

Expansión de los europeos prehistóricos

Así se difunde una secuencia génica

Tres cuartos de los europeos proceden, por vía matrilineal, de una población europea del período preglacial y están estrechamente emparentados con los vascos. Muchas líneas genéticas se expandieron, después de la glaciación, desde el sudoeste europeo hacia el norte y el este. Los dos mapas muestran la propagación y la frecuencia actual de estos grupos genéticos.





DE ACUERDO CON LA INVESTIGACION GENETICA, el oeste y norte de Europa se repobló, después de la glaciación, a partir de un territorio ibérico/surfrancés. Muchos tipos de ADN, en especial el "H" y el "V", difundidos por toda Europa se desplegaron entonces desde ese enclave. Aquí se representa la expansión (*izquierda*) y la distribución actual (*arriba*) del "V". Este tipo aparece con mayor frecuencia en el País Vasco y su presencia disminuye con la lejanía. Se da en uno de cada cinco vascos y aproximadamente en uno de cada veinte alemanes. Aunque entre los lapones (no figuran en este mapa) su frecuencia es doble que entre los vascos, se trata de una variante genética joven que se extendió mucho por el norte de Escandinavia.

THOMAS BRAUN; FUENTE: A. TORONI ET AL.

en buena medida, el genotipo de los europeos actuales y que, más tarde, con la llegada de los primeros agricultores del Neolítico se dejara sentir la aportación masculina.

Para establecer la exactitud de tales suposiciones habrá que esperar ahondar en las investigaciones genéticas, del cromosoma Y en particular. Al heredarse éste del progenitor masculino podría aportar información sobre la vía patrilineal. En un estudio del cromosoma Y, Ornella Semino, de la Universidad de Pavía, conjuntamente con un equipo internacional, ofrecen resultados que encajan con los obtenidos a partir del genoma mitocondrial: sólo alrededor de un 20 % de las líneas Y reseñadas en Europa aparecieron aquí en una época reciente. Debió producirse una onda expansiva a partir de la península Ibérica. Con todo, la ordenación cronológica de estos datos es todavía poco segura.

Lo expuesto sobre la repoblación de Europa no debe reputarse un caso especial, regional. Al fin y al cabo, la glaciación fue un fenómeno global. Desde un planteamiento genético se advierten efectos similares en otros continentes. Hemos consagrado sendos proyectos al genoma mitocondrial de las poblaciones de Asia y América. En el caso de Asia contamos con la colaboración de Arne Röhl, de la Universidad de Hamburgo, Antonio Torroni, de la Universidad de Pavía, y Colin Renfrew, de la Universidad de Cambridge. Lo mismo en el estudio referente a Asia que en el de América apreciamos una despoblación glacial de las latitudes septentrionales y una posterior repoblación.

Inmigración excepcional

Comprobamos, por ejemplo, que en el rastreo genético de indios de diferentes zonas de América volvían a manifestarse los cuatro tipos básicos de ADN mitocondrial, que se extienden desde Tierra de Fuego hasta Canadá. La antigüedad de los cuatro tipos es de unos 25.000 años. Por consiguiente, hubo una migración singular de Asia a América, a través de un estrecho de Béring seco, antes del apogeo de la era glacial (hace unos 20.000 años). En dicha época los glaciares no cerraban todavía el paso al sur.

Sin embargo, entre las tribus de esquimales y na-denes del extremo norte y noroeste de América aparece, de un modo casi exclusivo, uno de los cuatro tipos genéticos. Las formas variantes de este tipo, además, no superan allí los 10.000 años de antigüedad. Se trata, pues, de pueblos que se expandieron por las regiones del norte después de la glaciación, una conclusión que encaja con la tesis de Joseph Greenberg sobre el origen de las lenguas de América.

En el este asiático nos volvimos a encontrar con el escalonamiento genético entre el norte y el sur. Un fenómeno advertido ya antes por otros. La frontera se sitúa al norte de Corea.

Si en el sudeste asiático registramos, en el ADN mitocondrial, unos seis tipos de expansión con más de 30.000 años de antigüedad, que habían participado en la primera colonización de América, en el norte la situación se nos mostró distinta. Aquí encontramos, de una forma casi exclusiva, líneas derivadas cuya edad no supera los 16.000 años. Según cabe presumir, estos grupos, llegados al norte tras la glaciación, habían borrado en la Siberia oriental las huellas que todavía quedaban de comunidades indias preexistentes. Se debate, no obstante, si en el centro y norte de Asia se da un equivalente lingüístico de la repoblación genética, similar a lo sucedido en Europa y América. En estas cuestiones nos movemos en la frontera de lo cognoscible. Nos proponemos, en un trabajo en equipo e interdisciplinar, alejar en lo posible esa barrera.

Bibliografía complementaria

BASKEN, SEMITEN, INDOGERMANEN. Theo Vennemann en *Sprache und Kultur der Indogermanen*, pág. 119; Innsbruck, 1998.

VOLKSETYMOLOGIE UND ORTSNAMENFORSCHUNG. Theo Vennemann en *Beiträge zur Namensforschung*, vol. 34, n.º 3, pág. 269; 1999.

A SIGNAL FROM HUMAN MTDNA, OF POST-GLACIAL RECOLONIZATION IN EUROPE. Antonio Torroni et al. en *The American Journal of Human Genetics*, vol. 69, pág. 844; 2001.

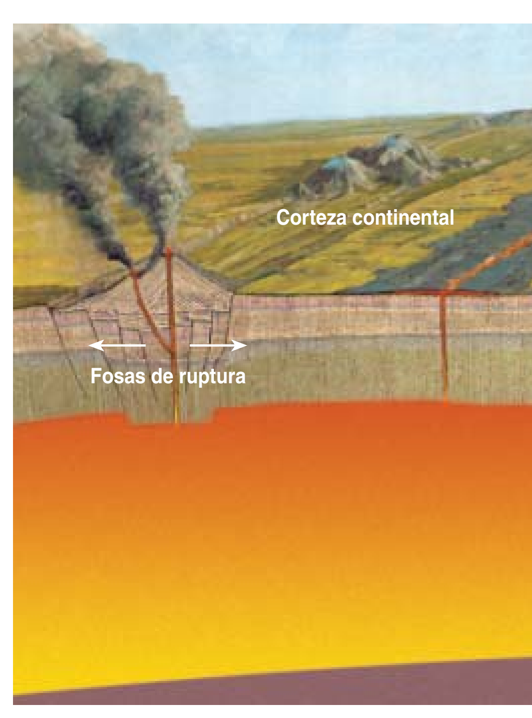
De las profundidades de la tierra a las profundidades del sistema solar

Mario Trieloff y Tilmann Althaus

Cuando en una noche despejada observamos Marte, Venus, Júpiter o Saturno y nos preguntamos cómo se ha originado el sistema solar, no suele ocurrírsenos que la respuesta pueda hallarse en dirección contraria adonde miramos, en las profundidades mismas de la Tierra.

La Tierra es la parte del sistema solar que nos proporciona la mayor parte del material para las investigaciones geoquímicas en el laboratorio. El problema estriba en que las pruebas que con mayor facilidad se consiguen pertenecen a la superficie, que poca información aporta acerca de la composición *media* de la Tierra. La corteza de ésta viene a ser una "espuma", bastante peculiar, muy heterogénea, que se separó pronto del manto terrestre y lleva más de cuatro mil millones de años sometida a variadas influencias. Hay que mencionar, por un lado, la descomposición debida a la interacción con las sustancias atmosféricas (el agua, el dióxido de carbono y el nitrógeno), que ha hecho que el manto terrestre "exude" en la atmósfera e hidrosfera; por otra parte, se acumulan en la corteza terrestre elementos incompatibles que no casan bien, debido al tamaño de sus iones o a su carga eléctrica, con los minerales del manto (el olivino o el piroxeno, por ejemplo; *véase el recuadro* "Xenolitos") y que salen de éstos sobre todo por fundición.

Para reconstruir la composición originaria de la Tierra precisamos también, por consiguiente, datos sobre el interior terrestre. Pero, ¿cómo podemos obtenerlos? Aquí nos ayuda la naturaleza. El vulcanismo arroja a la superficie rocas del interior terrestre.



T. ALTHAUS (*arriba*); DE TIME-LIFE 1982 (*derecha*)

Corrientes de lava en Hawai

La investigación de los gases nobles guardados en las rocas del interior de la Tierra informa acerca de los primeros tiempos del sistema solar

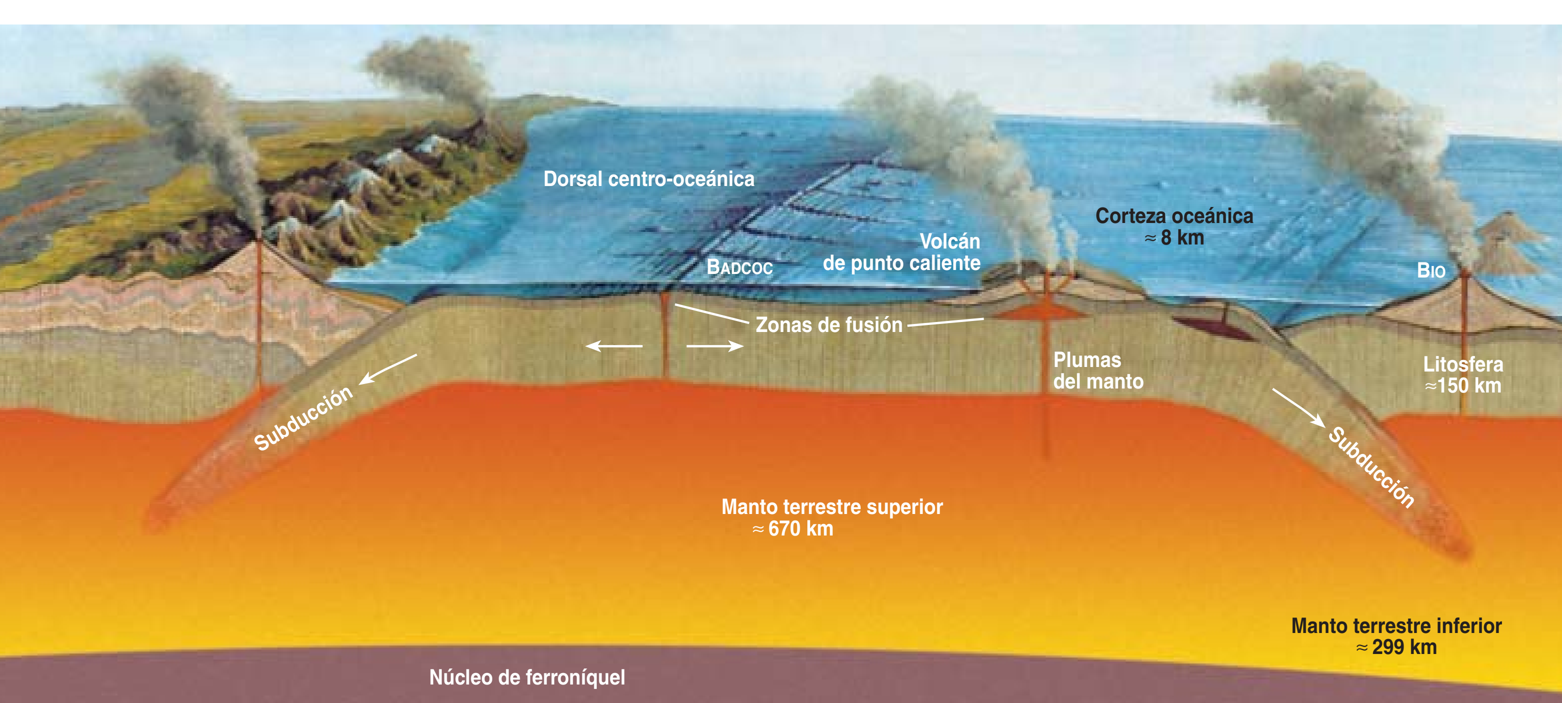
De zonas no demasiado profundas del manto superior de la Tierra proceden las lavas expulsadas en las dorsales centro-oceánicas; forman allí suelo oceánico nuevo. Estas rocas reciben, por su origen, el nombre de basaltos dorsales centro-oceánicos, o BADCOC. Por el contrario, las rocas arrojadas por los volcanes de las islas oceánicas vienen de regiones de la Tierra más profundas. Se las designa con el acrónimo BIO, de basaltos insulares oceánicos. Los BADCOC nos dan, por tanto, información acerca del manto terrestre más superficial (o superior), mientras los BIO representan el manto profundo. Las islas oceánicas suelen aparecer en viejas cadenas; se forman cuando las placas tectónicas, en su deriva, pasan sobre un punto caliente activo casi estacionario de las profundidades del manto terrestre. El ejemplo más conocido son las islas Hawai.

En ambos casos surgen las lavas en zonas restringidas, como consecuencia de la fusión de las rocas del manto a unos 50 a 100 km de profundidad; los volcanes las arrojan a la superficie, donde se solidifican. Cuando aparecen bajo el agua forman lavas "en almohadilla", cuyos bordes se enfrían bastante deprisa y solidifican en forma de vidrios. Debido a su rápido enfriamiento, no afectan de manera considerable a estos vidrios las interacciones con el agua, la atmósfera u otras rocas de la superficie terrestre; conservan una óptima información acerca de las lavas y, con ello, acerca del interior del manto. Ciertamente, es necesario tener en cuenta que con esto sólo se puede analizar una parte del material del manto: los componentes que se funden con facilidad. También se cuenta con auténticos "fragmentos" del manto terrestre, en gran parte sólido. Estos fragmentos rocosos, arrastrados por la lava, se designan con el nombre de xenolitos.

Laboratorio y astronomía

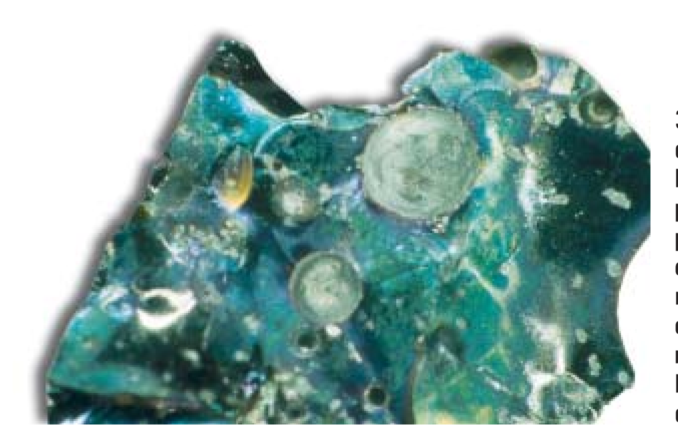
Estas muestras de roca se investigan con análisis químicos de laboratorio. Modernos espectrómetros de masa permiten detectar can-

1. CORTE DEL INTERIOR DE LA TIERRA (no está dibujado a escala). El vulcanismo BADCOC se debe a procesos de fusión en el manto superior de la Tierra, mientras que el vulcanismo BIO tiene su origen en yacimientos profundos del manto.





2. TIPICAS LAVAS "DE ALMOHADON" en una dorsal centro-oceánica.



3. CORTEZA VITREA de la lava de almohadón. Se aprecian perfectamente pequeñas burbujas en la masa vítrea negra. Indican un contenido de gas más alto de lo usual, lo que posibilita medidas muy precisas.



4. ESPECTROMETRO DE MASAS para gases nobles. Una alta tensión acelera los isótopos de los gases nobles y grandes electroimanes curvan y separan sus trayectorias, según la masa de cada isótopo; por último, en el extremo del tubo de vuelo, inciden en un detector.

NICOLAS, DIE MITTELOZEANISCHEN RÜCKEN. SPRINGER-VERLAG 1995 (*arriba*); M. TRIELOFF (*centro*); T. ALTHAUS (*abajo*)

tidades pequeñísimas de elementos muy raros. Se obtiene así su composición isotópica (la abundancia relativa de los distintos isótopos). También se someten a estos análisis muestras extraterrestres, de meteoritos o de muestras traídas a la Tierra por misiones espaciales, tripuladas o no. Disponemos de material de la Luna (aportados por las misiones Apolo), de Marte (gracias a los llamados meteoritos SCN) y de numerosos planetoides del cinturón de asteroides. De gran importancia es la composición media de una clase de meteoritos especialmente primitivos, las condritas CI. Estos meteoritos son ricos en elementos volátiles; las proporciones de los elementos que los componen coinciden con las proporciones en que están presentes en el Sol, determinadas espectroscópicamente, incluso en el caso de los elementos más volátiles, como el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y los gases nobles. Las proporciones de los elementos en las condritas CI se pueden determinar analíticamente con mucha mayor precisión; valen, pues, como vara de medir para las abundancias de los elementos solares o cósmicos.

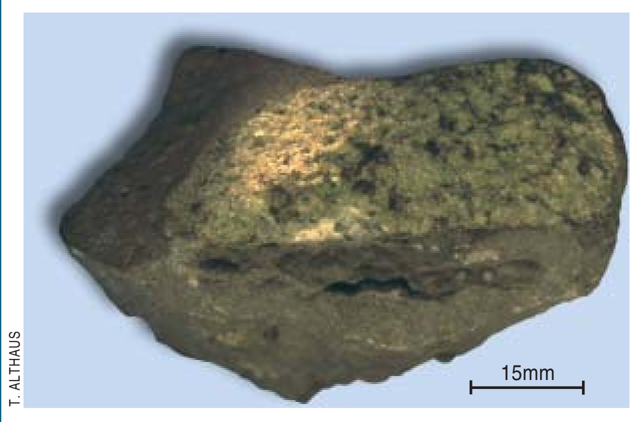
Estos ejemplos muestran la importancia de los métodos geocientíficos de laboratorio en nuestro conocimiento del origen y evolución del sistema solar. El estudio de muchos meteoritos, de los cuales la mayoría son trozos de planetoides del cinturón de asteroides, ha mostrado que los asteroides no proceden de un cuerpo anterior de gran tamaño que se fragmentó, sino de muchos pequeños cuerpos que se formaron independiente y rápidamente (en pocos millones de años). Nunca existió, por tanto, un gran planeta, destruido por una colisión catastrófica, en los dominios del actual cinturón de asteroides. El gran planeta Júpiter, con su intensa fuerza gravitatoria, impidió la formación de un planeta en esa región del sistema solar.

Demuestran también la importancia de los métodos geocientíficos de laboratorio las dataciones radiométricas precisas de los primeros materiales condensados en la nebulosa solar primitiva (calcio,

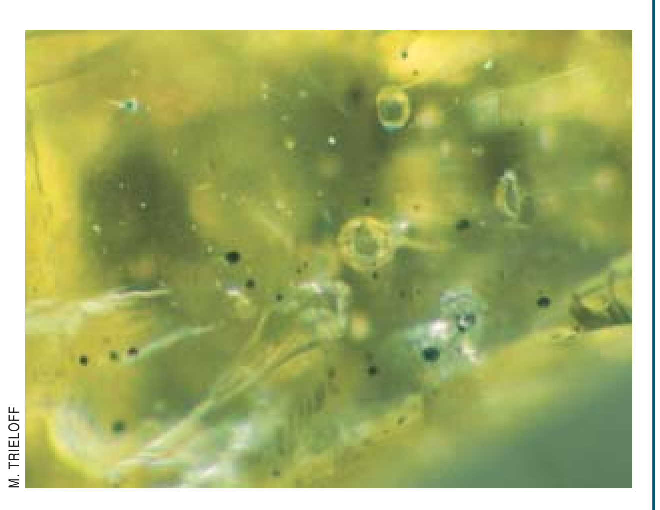
XENOLITOS

Los xenolitos son fragmentos de rocas incrustados en una matriz rocosa claramente diferenciada óptica y químicamente. El término deriva de las palabras griegas *xenos* (ajeno) y *lithos* (piedra); significa “piedra ajena”. En nuestro contexto se debe hablar con más precisión de “xenolitos del manto”. Los xenolitos del manto son fragmentos más o menos inalterados del manto sólido, arrastrados por una corriente de magma que subió hacia la superficie terrestre tal y como un río arrastra guijarros. No se trata necesariamente, por tanto, de restos de fusión de cuando se formó el magma, sino simplemente de material arrastrado. En las masas de material arrojadas por los volcanes basálticos se encuentran a menudo xenolitos del manto, popularmente llamados bulbos de olivino. Se encuentran en gran número en los depósitos del volcán “Dreiser-Weiher”, en la región alemana volcánica del Eifel, y en muchos otros volcanes de todo el mundo.

El más frecuente es la espinela-lherzolita (*véase la figura 1*), que debe su nombre a Lherz, localidad de los Pirineos franceses. Esta pesada roca de color verde claro se compone principalmente de los silicatos olivino (un 62 %), ortopiroxeno (un 26 %) y clinopiroxeno (un 15 %); el resto corresponde a la espinela, que le da el nombre, un óxido de aluminio, cromo y hierro. Los minerales aparecen como granos redondos de varios milímetros de diámetro. El manto terrestre se compone, hasta una profundidad de 70 a 80 km,



1. Xenolito del manto en basalto portador gris: es un “fragmento” del manto terrestre.



2. Cristal de olivino de un xenolito del manto con inclusiones fluidas redondeadas.

sobre todo de espinela-lherzolita. Se encuentran también piroxenita y dunita. La piroxenita consta casi exclusivamente de orto y clinopiroxenos, la dunita de olivino casi puro. El manto de la Tierra está compuesto por tanto de rocas sólidas; no debemos imaginarlo como un mar incandescente de lava fluida bajo una fina corteza terrestre. Más allá de unos 80 km de profundidad la presión y temperatura aumentan tanto, que los minerales de piroxeno no conservan ya esas condiciones y se transforman en estructuras de granate todavía más densas. Se habla entonces de granate-peridotita. Rara vez llega este material a la superficie terrestre. El nombre peridotita procede de peridoto, la piedra semipreciosa de transparente y brillante olivino verde.

En los minerales de los xenolitos del manto se encuentran intersticios vacíos llenos de gas (*véase la figura 2*); se los llama inclusiones fluidas. En general, estos gases encerrados suelen ser de dióxido de carbono (CO_2) casi puro. Pero hay además gases nobles mezclados. Se los libera, bien mecánicamente, por fraccionamiento en alto vacío, bien térmicamente, por calentamiento en un horno, de alto vacío también. Tras la separación de los gases químicamente activos, los gases nobles se pueden analizar con un espectrómetro de masas especial.

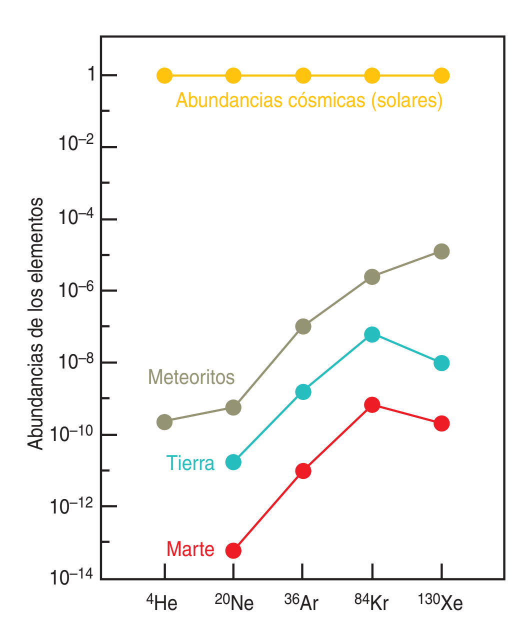
inclusiones ricas en aluminio de determinados meteoritos), de los meteoritos basálticos más antiguos procedentes de la superficie del asteroide Vesta (o eucritas) y de la propia Tierra (más exactamente: del instante de la formación del núcleo terrestre). Todas estas dataciones arrojan una misma edad, alrededor de 4560 millones de años, con pequeñas diferencias; transcurrieron sólo unos millones de años desde las primeras condensaciones en la primitiva nebulosa solar hasta la formación, una vez engendradas pequeñas y grandes partículas de polvo, de los planetesimales y de pequeños planetas de unos kilómetros de envergadura. La subsiguiente constitución de los grandes planetas llevaría todavía de unos 50 a unos 100 millones de años más. Estos resultados apoyan la hipótesis de que todos los cuerpos del sistema solar se formaron conjuntamente, como era de esperar a partir de la dinámica planetaria: la posición similar de las órbitas de los planetas respecto a la eclíptica, el sentido único de su revolución y de la rotación alrededor de sus ejes llevaron ya a Immanuel Kant a la misma conclusión.

Como último ejemplo, mencionemos la presencia en el sistema solar primitivo de isótopos radiacti-

vos de vida corta (*véase el recuadro* "Isótopos"), es decir, de materia arrojada por estrellas vecinas. Se trata de una indicación de que nuestro sistema solar nació en un cúmulo de estrellas. Parece que en el cúmulo donde se formó el Sol las estrellas de gran masa más antiguas habían concluido ya su evolución en la secuencia principal y recorrían los estadios finales de gigante roja o supernova. Diseminaron por sus alrededores materia, que cayó también en la nebulosa primitiva donde evolucionaba lentamente nuestro aún joven y poco masivo protosol.

Empobrecimiento en elementos ligeros del sistema solar interior

Volvamos ahora a las investigaciones geoquímicas de rocas terrestres de interés astronómico. El análisis de las rocas del interior y de la corteza terrestres permite calcular la composición media de la parte rocosa de la Tierra (es decir, sin el núcleo metálico de hierro y níquel) y compararla con la abundancia de los distintos elementos en el Sol. Dos hechos llaman en especial la atención. Primero, se observa un fuerte empobrecimiento de la proporción de elementos metálicos o afines a los metales, por ejemplo cobalto, cobre, zinc y oro. Estos elementos "emigraron" hacia el centro de la Tierra junto con el hierro y el níquel al formarse el núcleo terrestre. Segundo, aparece un marcado empobrecimiento de los elementos volátiles, así los elementos alcalinos litio, sodio, potasio, rubidio y cesio. Las investigaciones de laboratorio efectuadas con rocas extraterrestres procedentes de determinados asteroides, de la Luna o de Marte muestran el mismo déficit. En el caso del potasio, se constata este empobrecimiento también en planetas de los que hasta ahora sólo se dispone de datos obtenidos por sondas espaciales; es el caso de la superficie de Venus. Esto significa que el empobrecimiento en elementos volátiles —hasta en un factor 100— afecta a todo el sistema solar interior, no sólo a la Tierra.



5. ABUNDANCIAS de los gases nobles en cuerpos planetarios, normalizadas respecto a las abundancias cósmicas o solares. En los objetos del sistema solar interior han disminuido mucho, en especial las de los gases nobles ligeros.

Proporciones de gases nobles en el sistema solar interior

El empobrecimiento de elementos volátiles en el sistema solar interior afecta en especial a los componentes gaseosos y conduce a una "dicotomía" del sistema solar, a la separación entre los planetas terrestres, presentes sólo en el interior del sistema, y los planetas gigantes gaseosos, que se encuentran en su parte exterior. El grado de empobrecimiento (en varios órdenes de magnitud) se puede deducir de las razones entre las abundancias de los gases nobles. La *figura 5* muestra las concentraciones de los gases nobles, normalizadas con respecto a las proporciones cósmicas o solares. Para la Tierra y Marte, la cantidad total de gases nobles se ha dividido por la masa de cada planeta, puesto que estos astros se desgasificaron considerablemente en el curso de su evolución. Para los primitivos (o sea, en gran medida no desgasificados) meteoritos, se han representado las concentraciones medidas en las rocas. Por diversos motivos, los gases nobles son más adecuados que los otros gases para tales comparaciones. Por un lado, no se combinan con otros elementos: su abundancia, por consiguiente, no depende de procesos químicos (que sí actúan cuando la biosfera atrapa el carbono terrestre, o en la diferente volatilidad de las diversas combinaciones moleculares de los elementos gaseosos, como el carbono en el CO_2CH_4 o el nitrógeno en el N_2, el NH_3 etc.). Por otra parte, los gases nobles cubren un intervalo de masas atómicas grande; son, por tanto, más sensibles a los procesos dependientes de la masa atómica. Finalmente, deben tenerse en cuenta las anomalías en la formación de isótopos de los gases nobles por desintegración radiactiva (del uranio, del

Isótopos

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico pero con diferentes masas atómicas. Se diferencian entre sí por el número de neutrones de sus núcleos atómicos; el comportamiento químico no es distinto. Así, las proporciones entre isótopos no varían cuando se funde parcialmente una roca y se procede a la subsiguiente extracción. La composición de isótopos de una roca fundida procedente del manto refleja fielmente la firma de la fuente de procedencia.

Las variaciones de las proporciones de isótopos sólo se pueden medir mediante procesos físicos que dependan de la masa (o "fraccionamientos de masa"). La difusión es uno de ellos; también hay procesos nucleares, como la desintegración radiactiva de determinados isótopos madre, que modifican la composición isotópica con el aumento de la proporción de nuevos isótopos "radiogénicos". A los isótopos que no han sido formados por reacciones nucleares (excepto en las estrellas, antes de la creación del sistema solar) se los llama primordiales; sus abundancias no han variado desde el origen del sistema solar.

Todos los gases nobles poseen varios isótopos. El helio tiene dos, ^{3}He y ^{4}He (el índice superior delante del símbolo del elemento designa la masa atómica). El neón y el argón tienen cada uno tres isótopos.

Tabla 1. Isótopos primordiales y radiogénicos del helio (He), neón (Ne) y argón (Ar), junto con sus isótopos madre. Los isótopos radiogénicos proceden de los elementos madre por desintegración radiactiva (*en el caso de ^{21}Ne, por otras reacciones nucleares secundarias). La desintegración radiactiva no modifica la abundancia de los isótopos primordiales.

Isótopo primordial	Isótopo radiogénico	Isótopo madre
^{3}He	^{4}He	^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th
^{20}Ne, ^{22}Ne	^{21}Ne	Uranio, Torio*
^{36}Ar, ^{38}Ar	^{40}Ar	^{40}K

Tabla 2. Proporciones de los isótopos de los gases nobles más importantes en el aire, en los basaltos dorsales centro-oceánicos (BADCOC) y en los basaltos insulares oceánicos (BIO). Los basaltos BADCOC proceden de capas superficiales del manto, mientras que los BIO se originan en el manto terrestre profundo. Llaman la atención las grandes diferencias de las razones isotópicas de los BADCOC y los BIO.

Proporciones de isótopos	Aire	BADCOC	BIO/PLUMA
^{4}He/^{3}He	720.000	90.000	20.000
^{21}Ne/^{22}Ne	0,029	0,060	0,036
^{40}Ar/^{36}Ar	296	35.000	8000

Además de helio, neón y argón, están los gases nobles pesados criptón y xenón, con seis y nueve isótopos respectivamente. Entre los isótopos madre radiactivos hay que distinguir los de vida media corta y los de vida larga. Estos persisten activos y generan productos de desintegración mensurables. Los de vida corta sólo estuvieron activos justo después de su síntesis en las estrellas, es decir, en los primeros tiempos de nuestro sistema solar, después que la nebulosa solar se enriqueciese con la materia arrojada por estrellas de gran masa pertenecientes al joven cúmulo estelar.

torio o del potasio): posibilitan predicciones tanto sobre el origen de los gases nobles en sus diferentes depósitos como sobre su evolución. Así, por ejemplo, el depósito de los BADCOC muestra un exceso de núclidos radiactivos superior con respecto al manto terrestre profundo, señal de que se produjo una desgasificación todavía más intensa del manto terrestre a profundidades pequeñas.

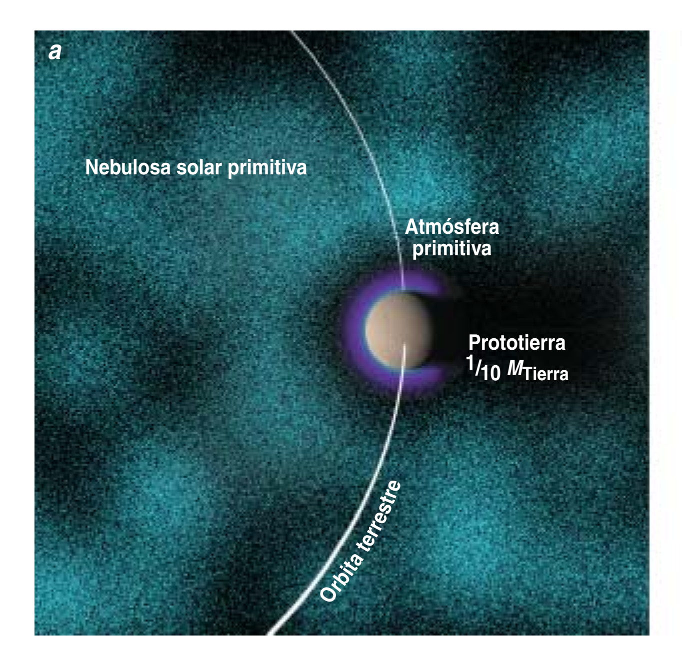
Las razones de las abundancias de los gases nobles de la *figura 5* muestran por tanto que el sistema solar interior es más pobre en gases nobles que en elementos volátiles formadores de rocas. La causa podría haber sido un fuerte viento solar durante el primitivo estadio T-Tauri de nuestro Sol, que barriese hacia afuera los gases y demás elementos volátiles del disco de acreción.

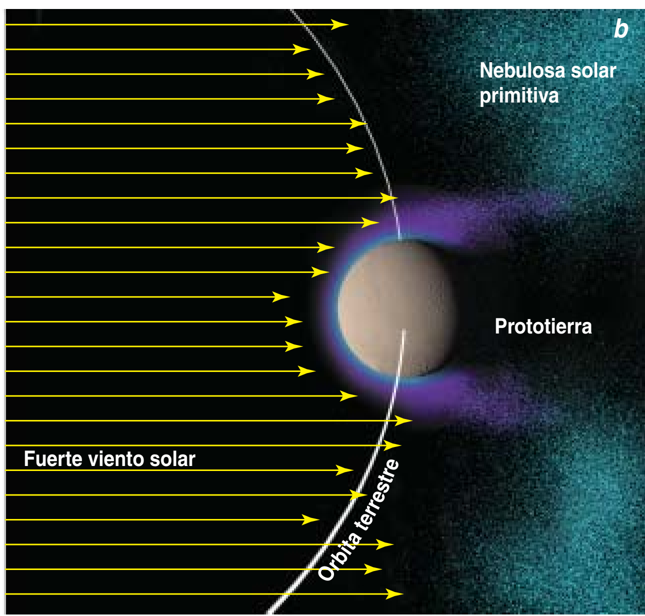
No está claro, sin embargo, en qué estadio de la acreción tuvo lugar esto, si en ese momento existían sólo planetesimales muy pequeños o bien ya había protoplanetas que se estaban desarrollando rápidamente. La respuesta a este problema tendría importantes consecuencias para nuestra comprensión del mecanismo que originó las atmósferas de los planetas terrestres, ya que unos planetas casi desarrollados habrían podido, con su fuerza gravitatoria, retener una atmósfera primitiva de composición solar. Con pequeños planetesimales, por el contrario, tendrían que haber actuado otros procesos; tal vez, la absorción de los gases por granos de polvo.

El origen de los gases nobles terrestres: ¿la desgasificación del manto terrestre?

La figura 5 muestra todavía otros detalles interesantes. Llama la atención que los planetas sean claramente más pobres en gases nobles ligeros que en los pesados. Se sabe desde hace mucho; se interpretaba como una indicación de que las atmósferas actuales no fueron capturadas directamente de la nebulosa solar por la gravitación de los protoplanetas; la similitud con el patrón de abundancias en los meteoritos llevaba a pensar que los planetesimales ya tenían en su interior durante el proceso de acreción los gases nobles, de manera que las atmósferas de los planetas se formaron por desgasificación del material que se estaba aglomerando. Esta hipótesis fue formulada por Carl Friedrich von Weizsäcker en 1937, apoyándose en consideraciones sobre el isótopo de gas noble ^{40}Ar. Este se produce por desintegración del isótopo de potasio ^{40}K, en tierra firme, pues. El isótopo del argón abunda más en la atmósfera terrestre; su abundancia cósmica es menor. Por consiguiente, sólo por desgasificación de la tierra firme puede haber llegado el ^{40}Ar a la atmósfera del planeta, de la que es el tercer componente más abundante, tras el nitrógeno y el oxígeno. Aunque la Tierra se ha desgasificado en gran medida, contiene todavía pequeñas, pero mensurables, trazas de gases nobles, encerrados en rocas.

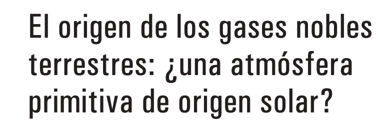
Si estos gases nobles consisten, pues, en remanentes de la desgasificación del manto terrestre, deberán guardar una relación unívoca con los gases nobles de la atmósfera. Aunque la mayor parte de los gases nobles se encuentre ya en la atmósfera, también en este caso conviene, pues, echar una mirada al interior de la Tierra. Gracias al metódico progreso del análisis de los gases nobles, sabemos que el manto de la Tierra contiene (con respecto a los isótopos “primordiales”) más isótopos de gases nobles proceden-





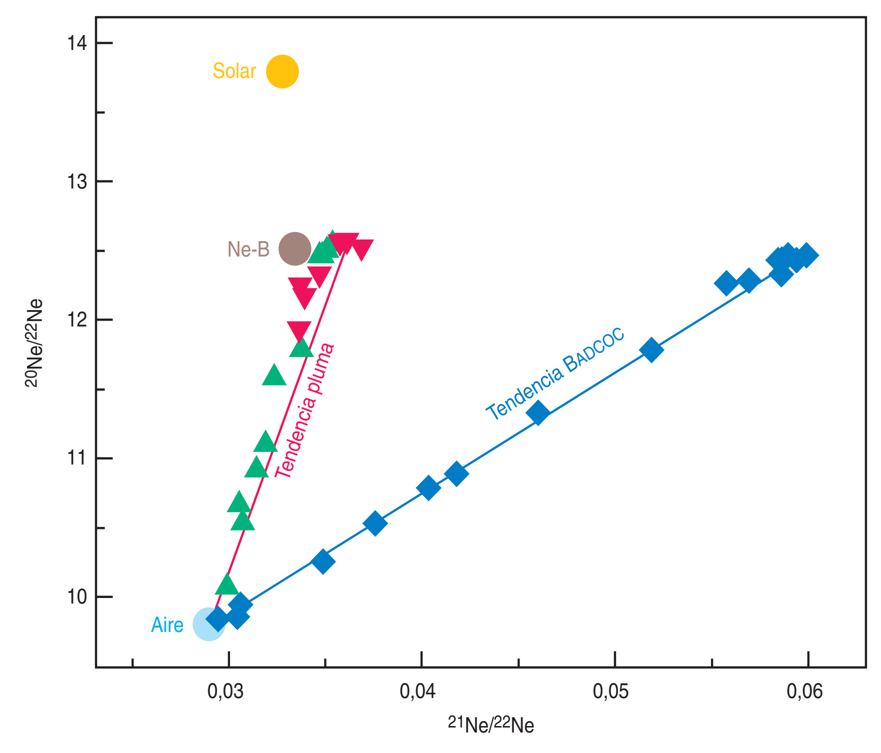
6. EMPOBRECIMIENTO DE LOS ELEMENTOS VOLATILES en un estadio posterior de la formación de los planetas. Primero aparece en la nebulosa solar primitiva una "prototierra", con más de un décimo de la masa terrestre actual (*a*). Después, un intenso viento solar barre la parte gaseosa de la nebulosa solar primitiva junto con la protoatmósfera de origen solar (*b*).

tes de la descomposición radiactiva que la atmósfera. Es una señal de que el manto terrestre entregó muy temprano a la atmósfera los isótopos primordiales; gracia a ello pudo haber un enriquecimiento de los isótopos radiactivos en el interior de la Tierra. Puesto que además se encuentra un exceso de isótopos de vida muy corta, una gran parte de la desgasificación del manto debió de tener lugar muy temprano. El cálculo da unos 100 millones de años tras el comienzo de la acreción (es decir, dentro del primer dos por ciento de la historia de la Tierra). Además, los gases nobles nos informan sobre el grado de desgasificación de los diferentes depósitos del manto. El manto terrestre superficial (BADCOC) contiene más isótopos radiactivos de gases nobles (^{4}He, ^{21}Ne, ^{40}Ar) que el manto terrestre profundo (BIO). Hay que atribuirlo a una carencia en isótopos primordiales y significa que el manto superficial BADCOC se ha desgasificado más.



El origen de los gases nobles terrestres: ¿una atmósfera primitiva de origen solar?

Si la hipótesis de la desgasificación es correcta, debe cumplirse una condición importante, a saber: los isótopos "primordiales" del in-



7. DIAGRAMA ISOTOPICO del neón. Muestra la razón ^{20}Ne/^{22}Ne en función de la razón ^{21}Ne/^{22}Ne. Los puntos azules representan medidas de cristales BADCOC, como los de la figura 3. Los puntos rojos y verdes son medidas de xenolitos del manto hawaianos y de vidrios basálticos islandeses; corresponden a un vulcanismo de plumas procedentes de depósitos de las profundidades de la Tierra.

Los autores

MARIO TRIELOFF estudia los meteoritos, los cráteres de impacto y las rocas del manto terrestre. TILMANN ALTHAUS investiga en Heidelberg desde 2001 los gases nobles de la cuenca de Panonia.

terior terrestre tienen que coincidir con los de la atmósfera. Esto parece ser cierto para los gases nobles pesados argón, criptón y xenón, pero no para el gas noble ligero neón. Hasta hace unos diez años se creía que el neón tenía la misma composición en el manto superior de la Tierra que en la atmósfera. Es lo que indicaban las mediciones de numerosas muestras del manto terrestre.

Sin embargo, a comienzos del decenio de 1990, las investigaciones con vidrios basálticos del volcán submarino Loihi, de Hawai, arrojaron pequeñas desviaciones de las proporciones de los isótopos del neón con respecto a los valores atmosféricos. Este descubrimiento nos enseñó que la mayoría de las muestras de neón atmosférico medidas hasta entonces estaban "contaminadas". La composición isotópica del neón del manto se asemejaba más bien a la del neón solar. La existencia de neón solar en el interior terrestre parecía confirmar la siguiente hipótesis: se formó primero una prototierra a partir de la nebulosa solar primitiva, con más de un décimo de la masa actual. La parte gaseosa del disco de acreción (sobre todo hidrógeno, helio etc.) se hallaba todavía presente, de manera que la prototierra pudo retener gravitatoriamente una atmósfera primitiva de gases solares. Así pudieron también incorporarse éstos al interior de la Tierra.

A continuación, la porción de gases solares fue barrida por un intenso viento solar. La pérdida de gases y de otros elementos volátiles en el sistema solar interior tuvo lugar, por tanto, más bien tarde, completada casi ya la acreción de los planetas terrestres. De esta manera, a causa del intenso viento solar, se perdió también en gran parte la atmósfera solar primitiva de la Tierra, sobre todo los gases nobles ligeros. Los gases nobles pesados permanecieron en la atmósfera remanente, según el modelo de abundancias característico que se representa en la *figura 5*. La semejanza con las abundancias meteoríticas sería, conforme a este orden de cosas, más o menos casual.

Neón solar en el manto terrestre

Se han encontrado, pues, indicios de procesos de desgasificación y de la existencia de una atmósfera solar primitiva que en parte se contradicen. Para resolver esa aporía podemos apoyarnos en investigaciones aún más exactas de los isótopos del neón en rocas del manto terrestre. El neón consta de tres isótopos, con masas atómicas 20, 21 y 22. En el manto terrestre ^{20}Ne y ^{22}Ne son de origen primordial; sólo el ^{21}Ne se puede haber formado en cantidades significativas mediante procesos radiactivos.

En la *figura 7* se comparan las razones isotópicas ^{20}Ne/^{22}Ne y ^{21}Ne/^{22}Ne. Nos interesa aquí la variación de la proporción ^{20}Ne/^{22}Ne, es decir, de los isótopos primordiales: la composición atmosférica (en la figura designada como "aire") tiene una razón ^{20}Ne/^{22}Ne de 9,8 y se diferencia de la composición solar, con una proporción de 13,8. Aunque algunos puntos de medidas de la *figura 7* están próximos a la composición atmosférica, parece que se trata de una mera contaminación de las muestras con neón de la atmósfera.

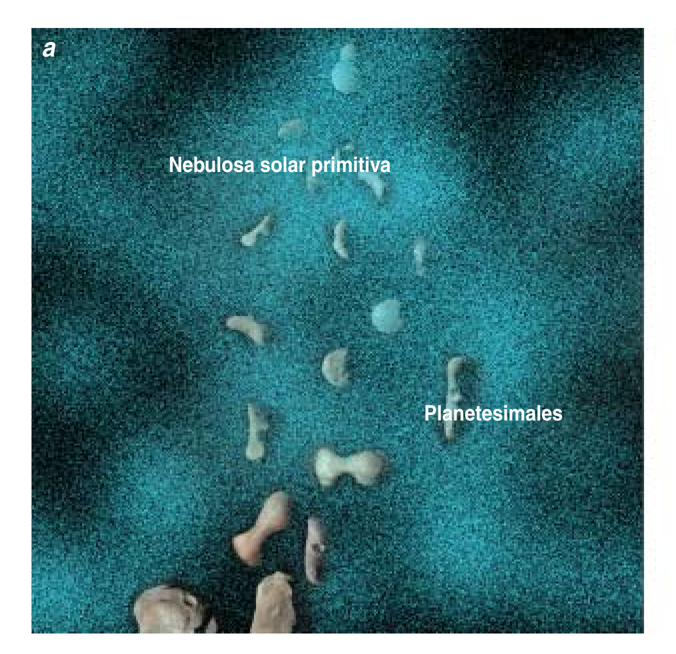
El neón del manto tiene claramente una proporción ^{20}Ne/^{22}Ne más alta que el atmosférico, lo que descubre un origen solar. Se percibe en la figura: las muestras de los diferentes depósitos del manto se sitúan sobre líneas rectas ("Tendencia de las plumas" y "Tendencia BADCOC"), que se extienden desde la composición del aire hasta proporciones más altas de ^{20}Ne/^{22}Ne. Los puntos más altos medidos de la razón ^{20}Ne/^{22}Ne contienen la mayor parte de neón del manto; por consiguiente, son los menos contaminados con neón atmosférico. Los componentes del manto propiamente dichos (BADCOC y plumas) aparecen en la figura, pues, con valores altos de ^{20}Ne/^{22}Ne, pero no coinciden en la razón ^{21}Ne/^{22}Ne. De ahí la diferencia entre la tendencia de las plumas y la de los BADCOC.

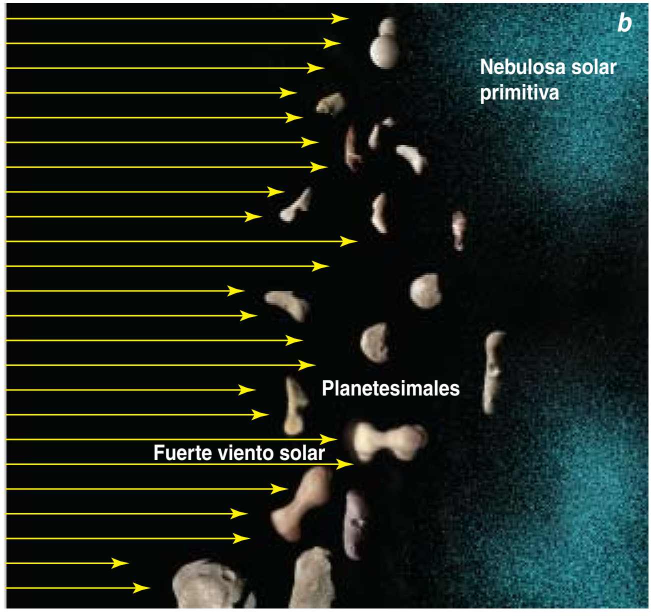
Los puntos representados en la figura en rojo y verde son los resultados de medidas de alta precisión de los isótopos de neón, realizadas hace poco en el Instituto de Física del Globo de París. Sorprende el resultado. Se han estudiado productos de cristalización (dunitas) procedentes de la cámara magmática del ya mencionado volcán marino Loihi. Las dunitas se encontraban en basaltos, arrancados con una "pala de arrastre", durante un viaje del barco de investigación *Kane Keoki*, de corrientes de lava solidificada del volcán a profundidades de entre 1400 y 2200 metros. Se utilizaron como muestras también vidrios basálticos procedentes de Islandia, expulsados por erupciones ocurridas bajo glaciares, y que, lo mismo que los vidrios basálticos submarinos, se solidificaron rápidamente.

Viento solar en la Tierra

En la *figura 7* se aprecia claramente que los puntos medidos se extienden sobre una recta, desde la composición atmosférica hasta los componentes propios del manto con razones ^{20}Ne/^{22}Ne altas. El resultado sorprendente de las mediciones fue, con todo, la concentración de las razones ^{20}Ne/^{22}Ne en torno del valor 12,5. Esto no corresponde a la composición solar invariable, con una razón ^{20}Ne/^{22}Ne de 13,8. El valor máximo de 12,5 es más bien típico del neón solar tal y como lo "implanta" el viento solar, en forma de chorro de partículas, en los meteoritos. Este neón se designa como "Ne-B".

La diferencia en las proporciones isotópicas se establece mediante fraccionamiento de masas, es decir, mediante procesos que afecten de manera distinta a isótopos de masas diversas. Así, por ejemplo, los isótopos de neón ligeros son algo más raros en la parte del viento solar de mayor energía y, por tanto, más veloz. Estas partículas energéticas se disparan sobre las superficies rocosas más profunda y eficazmente, de manera que la relación ^{20}Ne/^{22}Ne desciende de 13,8 a 12,5.





8. EMPOBRECIMIENTO DE LOS ELEMENTOS volátiles en un estadio temprano. Cuando la parte gaseosa del disco estaba todavía presente, la envergadura de los planetesimales en acreción no pasaba de 1 km (*a*). Tras el enrarecimiento de los gases solares, el viento solar se implantó sobre la superficie de los pequeños planetesimales (*b*).

Con todo, para que se incorporara suficiente neón del viento solar en la Tierra primitiva (o en los planetesimales que estaban formando la Tierra por acreción) hubieron de cumplirse dos condiciones fundamentales: por un lado, el componente gaseoso de la nebulosa solar primordial tenía que estar ya tan rarificado, que la radiación solar de partículas pudiese llegar hasta la zona de la órbita terrestre. Por otro lado, los planetesimales habían de ser todavía lo suficientemente pequeños, un cálculo aproximado da entre 10 y 1000 metros, como para que alcanzaran las concentraciones de neón requeridas. Cuanto menor es un cuerpo, mayor es la razón entre superficie y masa; la implantación superficial es en correspondencia más efectiva. Esto significa que la porción de gas del disco de acreción se había disipado ya cuando los planetesimales no pasaban todavía de 1 kilómetro de envergadura.

Tras la rarificación de los gases solares, el viento solar podía implantarse con la suficiente concentración en las superficies de los pequeños planetesimales. Pero, si la porción de gas del disco de acreción hubiera desaparecido ya en este estadio temprano de la formación de planetesimales, al progresar la acreción de la primitiva prototierra no habría habido gas solar a partir del cual se hubiese podido constituir una primitiva atmósfera solar alrededor de la Tierra. Esto entra en contradicción directa con los modelos del empobrecimiento de elementos volátiles de la atmósfera primitiva (*véase la figura 6*).

De los resultados del análisis del neón se desprenden muy importantes predicciones sobre elementos esenciales de la historia temprana del sistema solar interior. Muy pronto, antes incluso de que se formaran protoplanetas, tuvo lugar un empobrecimiento del gas y de otras sustancias volátiles. La causa probable fue un viento solar fortísimo durante el estadio T-Tauri de nuestro Sol; la Tierra muestra todavía huellas de esta pronta irradiación. La formación de los planetas propiamente dicha tuvo lugar después, en un entorno, en comparación, pobre en gas. Los planetas terrestres, por tanto, no pudieron nunca adquirir una atmósfera primitiva de origen solar.

La cuestión de si el valor límite de la razón de isótopos $^{20}Ne/^{22}Ne$ en el manto terrestre es 12,5 o 13,8 acarrea, por tanto, enormes consecuencias para la historia de la formación por acreción de la Tierra (y por tanto también para la de los demás planetas terrestres) en el primitivo sistema solar.

Resumen

Los métodos geoquímicos de investigación de isótopos en las rocas terrestres o extraterrestres son muy valiosos para la astronomía planetaria. Los análisis de los gases nobles elementales y de su composición isotópica han proporcionado una gran cantidad de información sobre la evolución de la atmósfera de la Tierra. La temprana desgasificación del manto terrestre dentro de los 100 primeros millones de años desempeñó un importante papel, aunque procesos de desgasificación parecidos tienen lugar todavía hoy (por ejemplo, mediante el vulcanismo). El estudio de los gases nobles proporciona también informaciones sobre la aparición de los otros planetas terrestres.

Los análisis del neón descritos aquí, que indican una implantación del viento solar en la fase de acreción, representan en cierta medida una excepción. Hasta ahora, se precisaban mediciones de rocas extraterrestres, meteoritos primitivos que

apenas hubiesen sufrido alteraciones químicas o muy antiguos, para entender la formación de la Tierra. Las rocas de otros cuerpos celestes nos revelan sobre el origen de la Tierra cosas que no podemos aprender de las rocas terrestres. La Tierra es un planeta tectónicamente muy activo; no quedan ya rocas de sus primerísimos tiempos. En eso difiere de los asteroides, de la Luna, de Marte y de Mercurio.

Ahora, en cambio, las investigaciones del interior terrestre nos muestran que la Tierra guarda enseñanzas acerca de los demás objetos del sistema solar. Conocemos también viento solar implantado en los meteoritos, pero en estos pequeños cuerpos su origen ha podido ser más reciente. El que la Tierra misma, un planeta de mayores dimensiones, muestre en su interior restos del viento solar implica, por necesidad, que los pequeños planetesimales de los inicios del sistema solar tuvieron que sufrir una irradiación. Sólo unos cuerpos pequeños pueden incorporar viento solar en las cantidades necesarias, merced a la favorable relación entre sus superficies y sus volúmenes. En el caso de la Tierra, sólo fue posible durante la fase de acreción, en los muy primeros millones de años de su formación, pero no durante los 4500 siguientes.

Observar las profundidades de la Tierra posibilita la vislumbre de los orígenes del sistema solar.

Bibliografía complementaria

POSSIBLE SOLAR NOBLE-GAS COMPONENT IN HAWAIIAN BASALTS. M. Honda, I. McDougall, D. B. Patterson, A. Doulgeris y D. A. Clague en *Nature*, vol. 349, págs. 149-151; 1991.

ALLGEMEINE GEOLOGIE. F. Press, R. Sievers. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlín-Oxford, 1995.

THE NATURE OF PRISTINE NOBLE GASES IN MANTLE PLUMES. M. Trieloff, J. Kunz, D. A. Clague, D. Harrison, C. J. Allègre en *Science*, vol. 288, págs. 1036-1038; 2000.

NOBLE GAS GEOCHEMISTRY. M. Ozima y F. A. Podosek. Cambridge University Press, 1983, nueva edición 2001.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Fuerzas de marea

En los días de marea viva, el mar ataca dos veces al día las dunas que bordean la magnífica bahía del Somme. Esta rara violencia nos impresiona, pero no nos es extraño el regreso puntual del flujo. Tales idas y venidas, sabemos hoy, resultan de los efectos combinados de la Luna y el Sol. No es fácil explicar por qué las mareas se producen dos veces al día. El cálculo de la potencia generada por la fricción de las mareas es aún menos intuitivo. Los efectos de marea, capaces de desplazar el agua de los océanos, han frenado la Luna hasta impedirla cambiar de cara, crean volcanes en la superficie de uno de los satélites de Júpiter, desintegraron un cometa en 1992...

Ya en el siglo XII se explotaba la marea como fuente de energía. En el estuario del Rance, no lejos del Monte Saint Michel, giraban molinos de marea. Unas calas, cerradas por pequeñas presas, se llenaban cuando subía la marea. En la marea baja se liberaba el agua retenida para que accionara las ruedas de paletas de los molinos. Hoy, en el mismo lugar, se aprovecha la energía de las mareas en una central mareomotriz. Una presa cierra el estuario. El agua que lo atraviesa durante el flujo y el reflujo acciona 24 grupos generadores de 10 megawatts. La electricidad producida equivale a la generada por una central térmica que consumiera 100 toneladas de carbón por hora (250 megawatts). Impresionante, esa energía es sólo una parte ínfima de la liberada por la marea, que, dos veces al día, pone en movimiento las aguas de todos los océanos. Al moverse, esas aguas rozan con el fondo y las costas, fricción que disipa energía en forma de calor. ¿Cuál es la fuente de toda esta energía?

Primero hay que comprender qué fuerzas provocan los efectos de marea. Pensemos en un astronauta que flota libremente en el centro de la cabina de su nave, en órbita alrededor de la Tierra. Al igual que la nave, sufre la atracción gravitatoria del planeta. La aceleración debida a la gravedad no depende de la masa del cuerpo acelerado. Por esta razón, la nave y el astronauta recorren trayectorias iguales a la misma velocidad; entre sí, están inmóviles. Dado que no ve el exterior, el astronauta tiene la sensación de ingravidez, aunque en realidad sufre la acción simultánea de dos fuerzas que se compensan, la gravedad y la fuerza de inercia. Mientras que la gravedad apunta hacia el centro de la Tierra, la fuerza de inercia es centrífuga y resulta del movimiento orbital de la nave.

Efectos de marea

En la descripción anterior, tendríamos que precisar que las dos fuerzas sólo se compensan exactamente si el astronauta está en el centro de gravedad de la nave. En otro caso sufrirá unas fuerzas residuales. Si se coloca entre el centro de masa de la nave y la Tierra, sufrirá una atracción gravitatoria más fuerte que si se situase en el centro de gravedad de la nave: la gravedad podrá más que la fuerza de inercia y lo empujará hacia la Tierra. Si se coloca entre el centro de gravedad de la nave y las estrellas, la atracción gravitatoria será más débil que en el centro de gravedad, y derivará hacia las estrellas. Vemos que la diferencia entre las fuerzas que actúan genera unas pequeñas fuerzas residuales. Se las llama fuerzas de marea. Dadas las dimensiones de una cabina espacial, son imperceptibles. Un astronauta orbita en la estación espacial internacional a 407 kilómetros de altitud; si se aleja un metro del centro de masa de la estación, sufrirá una fuerza residual de una diezmilésima de newton aproximadamente. Las mismas fuerzas de marea se ejercen también sobre las distintas partes de la nave, a uno y otro lado de su centro de masas. Tienden a partirla en dos. De la misma manera, tienden a transformar un balón de fútbol en un balón de rugby, con el eje mayor orientado hacia la Tierra.

Sin embargo, esa deformación sólo resultaría perceptible si el balón llegara al tamaño de la... Luna. Nuestro satélite, con un diámetro de 3500 kilómetros, está deformado algunos metros por la diferente atracción terrestre en ambos lados del eje Tierra-Luna. La existencia de esos “abultamientos” no viene acompañada de ningún intercambio de energía, puesto que son estáticos. ¿Por qué motivo? A la vez que recorre su órbita, nuestro satélite gira lentamente sobre sí mismo, de modo que nos presenta siempre la misma cara. Esa perfecta sincronización resulta del efecto ralentizador que la marea de

DIBUJOS DE BRUNO VACARO

1. Hace mucho que se aprovecha la energía de las mareas, como en este viejo molino de Birlot, en la isla de Bréhat, al norte de la Bretaña francesa

la Tierra ha tenido sobre la Luna. Cuando nuestra compañera giraba más deprisa, el eje Tierra-Luna, y con él la deformación debida a la atracción, se desplazaba; así se generaban fricciones entre las rocas, que gastaron energía y frenaron la rotación lunar hasta que desapareció la causa de las fricciones, o sea, hasta que la Luna acabó por girar tan despacio como para que nos presente siempre la misma cara.

La Tierra pierde velocidad

Bastaron unas decenas de millones de años para que se armonizasen la velocidad de rotación de la Luna y su velocidad orbital. En cambio, se calcula que la Tierra necesita diez mil millones de años para concluir su frenado. Así pues, los 4500 millones de años de vida en común de la Tierra y la Luna no han bastado para que nuestro planeta presente siempre la misma cara a la Luna. Hoy, la Tierra gira sobre sí misma más deprisa que la Luna alrededor de su propio eje, y el eje Tierra-Luna (a lo largo del cual la Luna deforma las rocas terrestres) se desplaza permanentemente hacia el este. En pos de él va un abultamiento de una treintena de centímetros de altura.

El origen de la energía de las mareas, terrestres y oceánicas, ahora está claro: procede de la energía de rotación de la Tierra en torno a sí misma. Las mareas oceánicas tienen el mismo origen que las mareas terrestres. La Luna actúa también sobre los fluidos que bañan nuestro planeta: los océanos y la atmósfera. Crea así dos abultamientos líquidos en la superficie de los mares, situados a uno y otro lado de la Tierra. La amplitud de esa marea oceánica es todavía escasa; sólo del orden de un metro en el centro de los océanos. Sin embargo, como en la deformación de las rocas, los dos abultamientos líquidos tienden a alinearse con el eje Tierra-Luna, que es móvil. El paso, cada 12 horas, de un abultamiento en pos del eje Tierra-Luna se manifiesta en las costas en forma de grandes variaciones del nivel del mar y la aparición de corrientes.



2. Las fuerzas de marea transforman una esfera en órbita en un elipsoide. Del mismo modo, la Tierra deforma la Luna y la Luna deforma la Tierra

La amplitud del fenómeno sería siempre la misma si sólo se tratara de la Luna. La influencia del Sol, así como la forma de las costas y las cuencas oceánicas, entre otras cosas, explican que la amplitud de las mareas varíe según el lugar y a lo largo del año. Las medidas astronómicas confirman que el día terrestre se alarga unas dos milésimas de segundo por siglo, pues la disipación por la fricción debida a los efectos de marea oceánicos y terrestres ralentiza la rotación de la Tierra. Ese alargamiento del día es importante en períodos largos; así, hace 350 millones de años el día duraba 22 horas y el año 400 días.

La disipación de energía debida a las mareas tiene consecuencias muy importantes para Io. Ese satélite de Júpiter tiene prácticamente la misma masa, el mismo diámetro y el mismo radio orbital que nuestra Luna. Como ésta, ofrece siempre la misma cara a su planeta, pero con la muy notable diferencia de que Io sufre la atracción de un planeta gigante. Con una masa 300 veces la de la Tierra, Júpiter deforma a Io más de 300 metros. Tendría pocas consecuencias si esa deformación no variase con el tiempo. ¿Por qué varía, si Io presenta siempre la misma cara a Júpiter? Porque la órbita de Io es elíptica: la distancia del satélite a su planeta cambia, lo que modifica en un centenar de metros la amplitud de la deformación que sufre. Por añadidura, Io da una revolución completa en sólo 42,5 horas, mientras que la Luna rota en torno a la Tierra en 28 días.

El ciclo tracciones/compresiones rápidas que por esa causa sufre Io se ve acentuado por el paso regular de Europa, otro satélite de Júpiter. Al final, las fricciones que resultan de esa "flexión" periódica de las rocas de Io disipan una potencia considerable, de 10^{12} a 10^{14} watts. Una comparación muestra que esas fuerzas de marea liberan al menos tanto calor por segundo en el interior de Io como la radiactividad en el seno de la Tierra. Ahora bien, el volumen de Io es 50 veces menor que el de nuestro planeta. Todo ese calor que se disipa en el seno del satélite engendra una diferencia de temperatura considerable entre la superficie fría y las capas internas. La temperatura reinante en el centro de Io podría llegar a los 10.000 grados, lo que bastaría para fundir las rocas y crear en el satélite una actividad volcánica mucho más intensa que en la Tierra: volcanes gigantes empujan la superficie del satélite, desprenden océanos de lava y proyectan chorros de óxido de azufre al espacio.

Las fuerzas de marea pueden llegar a despedazar un cuerpo celeste. Ocurrirá si las fuerzas de atracción del planeta entre dos puntos extremos del satélite son superiores a la fuerza de cohesión de la roca de éste. Esa desintegración en vuelo se produce cuando un cuerpo frágil (un cometa, por ejemplo) pasa demasiado cerca de un planeta gigante. Ese fue el caso del Shoemaker-Levy 9 en julio de 1992. Al acercarse a Júpiter se partió en unos 21 fragmentos, el mayor de los cuales medía diez kilómetros de diámetro. Aquellos fragmentos se dispersaron a lo largo de la trayectoria del cometa y entraron en colisión con Júpiter en julio de 1994. Con deleite, los astrónomos siguieron aquel espectáculo cósmico debido a los efectos de marea.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

El número de oro

El número de oro, $\phi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1{,}6180339887499...$, es uno de los protagonistas indiscutibles de ese misterioso espacio en donde se encuentran matemáticas, arte y ciencia. Es un número singular desde el punto de vista matemático pero también estético, al menos según el canon iniciado por los griegos. Los *rectángulos de oro* o *áureos*, es decir, rectángulos en los que el cociente entre el lado mayor y menor es el número de oro, se hallan por doquier en el Partenón, en templos y construcciones griegas y en la composición de edificios, cuadros y fotografías a lo largo de toda la historia del arte.

Los rectángulos de oro están caracterizados por una interesante propiedad de autosimilaridad. Si de un rectángulo áureo extraemos un cuadrado cuyo lado coincida con el lado menor, el rectángulo que queda es también áureo, como ocurre con el rectángulo verde de la figura 1. Podríamos extraer un nuevo cuadrado y quedarnos con un rectángulo áureo más pequeño, y así sucesivamente, encontrando siempre rectángulos áureos.

Numéricamente, esta autosimilaridad equivale a lo siguiente:

$$\frac{1}{\phi} = \frac{\phi - 1}{1}$$

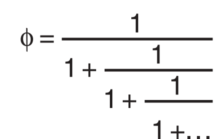
La ecuación anterior puede también escribirse en la forma:

$$\phi = 1 + \frac{1}{\phi}$$

que nos indica que el desarrollo decimal del inverso del número de oro es igual al desarrollo del propio número, es decir, $\phi = 1{,}618033...$ y $1/\phi = 0{,}618033...$

Pero, al margen de estas curiosidades matemáticas, ¿es este rectángulo el "más placentero a la vista", el más armonioso, como se supone que afirma el canon clásico? Probablemente no se pueda saber si realmente es o no más placentero, y, en caso de serlo, cuánto de esa sensación es producto de nuestra cultura. Sin embargo, en mi opinión, hay una cualidad de los rectángulos áureos que se puede apreciar en la fachada de los templos griegos. Se trata de una especie de referencia a alguna medida humana que hace que el edificio, aun siendo monumental, se muestre asequible, cercano. Quizás esta sensación provenga no tanto de la forma del rectángulo, como de que su proporción se repita en todas las escalas, desde los capiteles y los altares hasta la planta del templo completo. En cualquier caso, creo que cualquiera que se haya aproximado a uno de estos templos habrá podido percibir esta combinación de grandeza y accesibilidad.

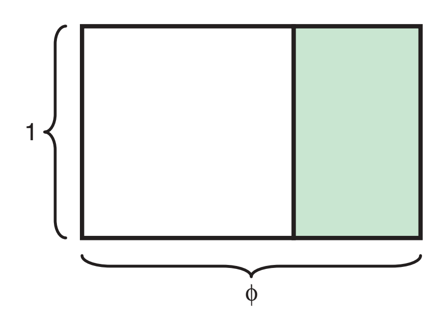
Todas estas cuestiones han sido el objeto, e incluso la obsesión, de muchos y voluminosos estudios que entrecruzan matemáticas e historia del arte. En Internet se pueden también encontrar cientos de páginas dedicadas a este tema. Nosotros vamos a ser más modestos y nos centraremos en algunas de las propiedades matemáticas y geométricas de ϕ. De la última de las ecuaciones anteriores, se deduce que el número de oro puede escribirse de esta curiosa manera:



$$\phi = \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \dots}}}$$

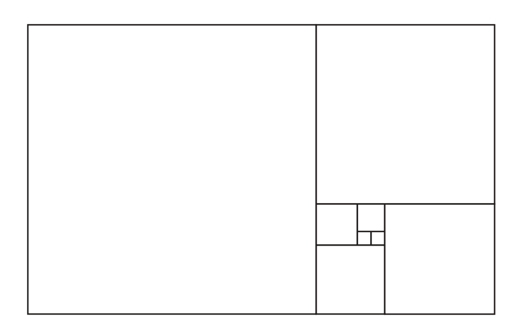
Esta forma de escribir un número como quebrados encabalgados unos sobre otros se llama *desarrollo en fracciones continuas*. En general, el desarrollo de cualquier número x es:

$$x = a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_3 + \dots}}}$$

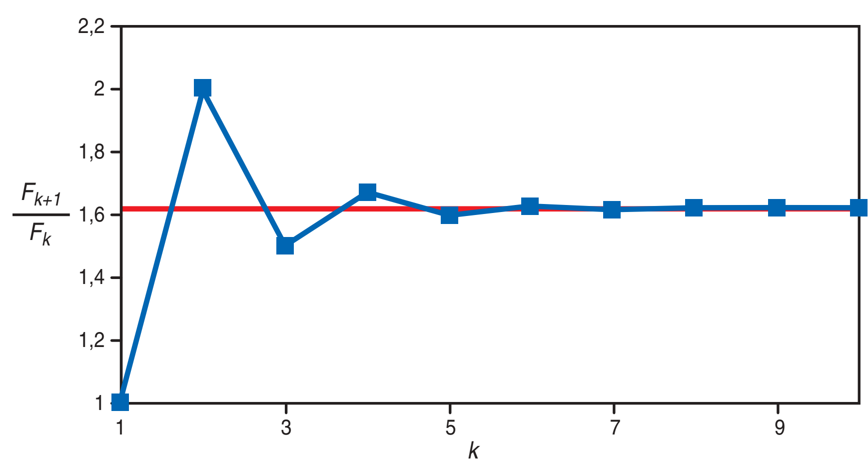


1. Si de un rectángulo áureo, de lados 1 y ϕ, retiramos el cuadrado blanco de lado 1, el rectángulo resultante (en verde) *es también áureo*

y se suele escribir $x = [a_0; a_1, a_2, a_3,...]$. El desarrollo en fracciones continuas es una forma de representar números tan válida como nuestro sistema decimal o como la representación binaria que utilizan los ordenadores. Todas ellas son formas de escribir números. En algunas de ellas ciertas operaciones son más sencillas que en otras. Por ejemplo, la suma es fácil de realizar en el sistema decimal o en el binario. En el decimal es muy sencillo multiplicar o dividir por 10. Sin embargo, en los desarrollos en fracciones continuas es muy simple, por ejemplo, hallar el inverso de un número. En efecto, el lector puede comprobar que, si $x = [a_0; a_1, a_2,$



2. Construcción de un rectángulo áureo a partir de cuadrados cuyos lados siguen la serie de números de Fibonacci: dos cuadrados de lado 1, otro de lado 2 y otro de lado 3, 5, 8, 13 y 21



3. Los puntos azules son el resultado de dividir un número de Fibonacci F_{k+1} por el inmediato anterior: 1/1 = 1, 2/1 = 2, 3/2 = 1,5, etc. La línea roja representa el valor de ϕ. El octavo Fibonacci divido por el séptimo, 21/13 = 1,615 es ya indistinguible de ϕ en la gráfica

a_3,...], siendo a_0 distinto de cero, entonces $1/x = [0; a_0, a_1, a_2, a_3,...]$.

Cada representación hace más evidentes ciertas particularidades de los números. En el caso del número de oro, su singularidad se pone de manifiesto en su desarrollo en funciones continuas, que es $\phi = [1;1,1,1,...]$. Esta singularidad se debe a que los desarrollos en fracciones continuas están relacionados con la forma de dividir un rectángulo en varios cuadrados. Un método gráfico para encontrar la representación en fracciones continuas de un número x, mayor que uno, consiste en construir un rectángulo de base x y de altura 1 y extraer de él tantos cuadrados de lado 1 como sea posible. El número de cuadrados será a_0. El rectángulo que queda (de lados 1 y $x - a_0$) se gira para que el lado mayor sea el horizontal y se vuelve a repetir el procedimiento de extraer cuadrados, en este caso de lado $x - a_0$. El número de cuadrados será a_1. El procedimiento se repite para encontrar a_2, a_3, etc. Si este procedimiento se comienza con un rectángulo áureo, el número de cuadrados que se pueden extraer es uno y el rectángulo que queda es de nuevo áureo, lo cual explica que el desarrollo en fracciones continuas de ϕ sea una sucesión infinita de unos.

Otra forma interesante de llegar al número de oro es utilizando los llamados *números de Fibonacci*, F_k. Los dos primeros son iguales a uno, $F_1 = F_2 = 1$, y el resto se construye como la suma de los dos anteriores, $F_k = F_{k-1} + F_{k-2}$. Es decir, $F_3 =$ $= 1 + 1 = 2$, $F_4 = 2 + 1 = 3$, $F_5 = 3 +$ $+ 2 = 5$, $F_6 = 8$, $F_7 = 13$, $F_8 = 21$, $F_9 =$ $= 34$. Resulta que el cociente entre dos números de Fibonacci consecutivos se acerca cada vez más al número de oro, como puede verse en la figura 3.

Existe una razón geométrica para este acercamiento, que se ilustra en la figura 2, y está también basada en rectángulos que contienen cuadrados. Construimos un cuadrado de lado unidad y otro igual pegado a su lado izquierdo. Sobre ellos construimos un nuevo cuadrado cuyo lado sea 2, la suma de los dos lados anteriores. A la izquierda de este conjunto formado por tres cuadrados, construimos uno nuevo, en este caso de lado 3. Vamos anexionando a la figura nuevos cuadrados cuyos lados siguen la secuencia de Fibonacci. Pues bien, los rectángulos resultantes son cada vez más parecidos a un rectángulo áureo. Al lector no le será muy difícil adivinar por qué, comparando la propiedad de autosimilaridad del rectángulo áureo con este procedimiento de construcción. Podrá también comprobar que el desarrollo en fracciones continuas de F_{k+1}/F_k consiste en $k - 2$ unos seguidos de un 2, seguido de infinitos ceros.

Al igual que el número de oro, los de Fibonacci también aparecen en muchos diseños de la naturaleza. Por ejemplo, el número de pétalos de la mayoría de las flores coincide con uno de los de la serie. Se han utilizado también en música, en pintura y en arquitectura. Virgilio, Leonardo da Vinci, Beethoven, Bach, Debussy, Bartók, Le Corbusier, el arquitecto del Partenón, todos ellos han utilizado ϕ o la serie de Fibonacci. En poesía la proporción áurea se ha utilizado para estructurar largos poemas; algunas métricas están basadas en el 8 y el 13, que son números de Fibonacci. En el cuadro presento un pequeño ejercicio, casi un experimento: un poema cuyos versos tienen un número de letras dado por la serie de Fibonacci. El poema hace además referencia al propósito original de Fibonacci cuando introdujo sus números: describir cómo crece la población de una cierta especie en la que cada individuo se reproduce dos veces a lo largo de su vida.

Debido al crecimiento de la serie de Fibonacci, los versos dibujan una suave pendiente exponencial y las proporciones entre las longitudes de versos consecutivos se acercan cada vez más al número de oro. ¿Se consigue con ello crear una cierta armonía en el poema?, ¿una evocación de los modos en que la naturaleza realiza sus propios diseños?

y
a
su
vez
salen
del árbol
pisan las hojas
secas del camino y cantan
extraños sones murmullos de luz y de agua
se colman de semillas y se vuelven dorados y se abandonan al viento
...

Mark Fischetti

Radar meteorológico

Con tiempo borrascoso, nos enseñará el hombre del tiempo mapas que indican con precisión, zona a zona, aguaceros y nevadas. Podría presumir del radar Doppler de su canal. La técnica está un buen trecho por delante de los radares comunes. No tardaremos en ver mayores avances.

Los radares emiten unas microondas que se reflejan en el agua, el hielo y otras partículas contenidas en la atmósfera. Por consiguiente, sólo pueden señalar la distancia y el tamaño de las partículas, de las gotas de lluvia. Pero los radares de efecto Doppler pueden también medir su velocidad y su dirección y dar así una imagen del flujo ventoso a distintas alturas. Actualmente, Estados Unidos cuenta con una red nacional, Nexrad, de 158 radares Doppler. La instaló en la década de 1990 la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA). Gracias a ella los meteorólogos del Servicio Meteorológico Nacional de la NOAA determinan los estados de alerta con una precisión mucho mayor que antes. La mayoría de los meteorólogos locales están suscritos a servicios comerciales que interpretan la información gratuita de la Nexrad; así observan los movimientos de tormentas y tornados casi en tiempo real, cosa imposible en otros tiempos.

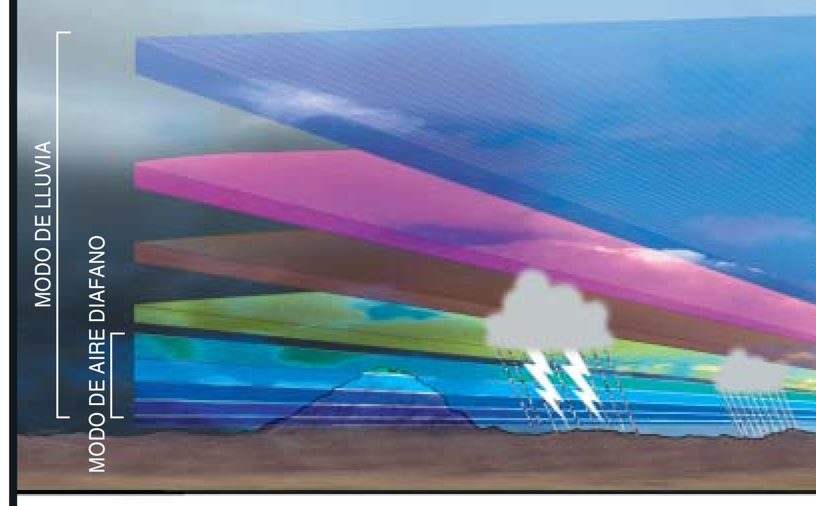
Pero los radares meteorológicos Doppler también tienen sus limitaciones. Como los haces apuntan ligeramente hacia arriba, para explorar la troposfera circundante, se les escapan las precipitaciones y vientos muy cercanos al suelo. Además, los haces sólo pueden determinar la anchura horizontal de las partículas que interceptan, pues únicamente transmiten ondas polarizadas horizontalmente (es decir, cuyo campo eléctrico yace en el plano horizontal). Los ingenieros del Laboratorio Nacional de Tormentas Intensas, en Norman (Oklahoma), están desarrollando unos radares polarimétricos que emiten también ondas polarizadas verticalmente, para calibrar las dimensiones verticales de las partículas. Estas mediciones duales brindarán una información más completa acerca del tamaño, la forma y la densidad de las precipitaciones, partículas de hielo y nubes, facilitando a los pronosticadores una mejor determinación de los regímenes de lluvia y nieve. La NOAA planea instalar estos aparatos de aquí en cinco o diez años.

El laboratorio de tormentas está asimismo experimentando con el radar de alineación en fase de la Armada de EE.UU., el instrumento más avanzado para la detección desde un barco de buques enemigos. Con haces y frecuencias múltiples, podría reducirse de cinco minutos a uno el tiempo en que los radares de las estaciones de la Nexrad barren una tormenta.

1. LA ANTENA DEL RADAR, de 8,5 metros de diámetro, gira merced a un mecanismo azimutal y se orienta hacia arriba alrededor de un eje. Un radiador de bocina emite microondas; el reflector paraboloide enfoca sobre él las señales de retorno. Una cúpula de fibra de vidrio protege el conjunto pero permite el paso de las microondas.

Cúpula

2. UNA ESTACION DE RADAR DOPPLER DE LA NEXRAD, con buen tiempo, hace cinco barridos de 360 grados de la atmósfera cada 10 minutos, con ángulos respecto al suelo que van subiendo de 0,5 a 4,5 grados. Alterna los barridos de reflectividad, en busca de precipitaciones, con los de velocidad, para determinar la velocidad y la dirección del viento. Con mal tiempo, realiza 14 barridos (*no representados todos*) desde 0,5 a 19,5 grados cada cinco minutos. Más allá de 225 kilómetros, los ecos de retorno proceden de grandes altitudes y sirven de poco. A los 160 kilómetros, el haz de 0,5 grados explora el aire entre los 2000 metros y los 5000 metros. No puede observarse el tiempo atmosférico en niveles muy cercanos al suelo ni en el "cono de silencio", justo encima del radar. Unos algoritmos programados eliminan los ecos procedentes de edificios y accidentes del terreno situados a menos de 35 kilómetros.

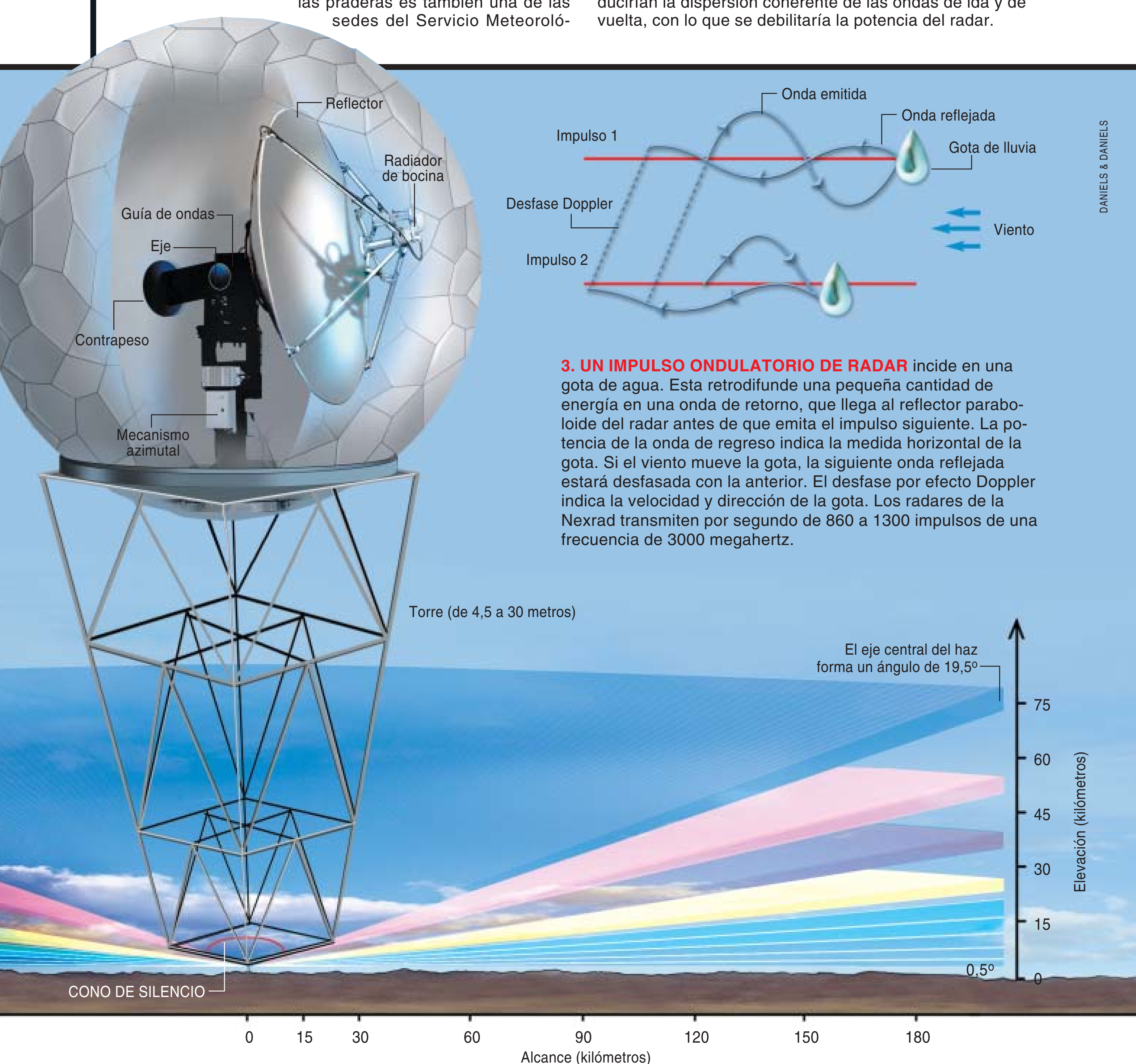


¿SABIA USTED QUE...?

➤ **AVES Y ABEJAS:** Según Jami Boettcher, instructor de radaristas del Servicio Meteorológico Nacional, los radares Doppler de la Nexrad son tan sensibles que detectarían una abeja que volase sola a casi 30 kilómetros de distancia. En los veranos pueden reunirse grandes formaciones de insectos junto a un frente frío que avanza; las lecturas imitan entonces una precipitación. En abril y septiembre, los ecos de las aves migratorias que siguen a los vientos imperantes son tan fuertes y sostenidos que se agregan falsamente a la velocidad percibida del viento. Se enseña a los pronosticadores a compensar esas anomalías.

➤ **TORMENTOSA NORMAN:** El radar Doppler se creó en el Laboratorio Nacional de Tormentas Intensas de la NOAA, en Norman (Oklahoma). Esta ciudad en medio de las praderas es también una de las sedes del Servicio Meteorológico Nacional de la NOAA, origen principal de la información, predicciones y avisos de emergencia meteorológicos en Estados Unidos, de la Sección de Formación para la Toma de Decisiones sobre Emergencias de dicho Servicio, que forma a los pronosticadores, y del Centro de Operaciones de Radar de la NOAA, que ofrece asistencia centralizada meteorológica, informática y de ingeniería a todos los radares de Nexrad.

➤ **LA CUPULA:** Mirada con atención, la cúpula geodésica, o radomo, que rodea al reflector paraboloide de un radar Doppler es todo menos regular. Los paneles de fibra de vidrio son de formas irregulares; cada uno posee una curvatura un poco distinta. Si fueran todos iguales y encajasen sin brusquedad, como en un balón de fútbol, producirían la dispersión coherente de las ondas de ida y de vuelta, con lo que se debilitaría la potencia del radar.



3. UN IMPULSO ONDULATORIO DE RADAR incide en una gota de agua. Esta retrodifunde una pequeña cantidad de energía en una onda de retorno, que llega al reflector paraboloide del radar antes de que emita el impulso siguiente. La potencia de la onda de regreso indica la medida horizontal de la gota. Si el viento mueve la gota, la siguiente onda reflejada estará desfasada con la anterior. El desfase por efecto Doppler indica la velocidad y dirección de la gota. Los radares de la Nexrad transmiten por segundo de 860 a 1300 impulsos de una frecuencia de 3000 megahertz.

NEXOS

James Burke

Salsa boloñesa

He de confesar una fatal debilidad por Bolonia. Aparte de albergar una de las más antiguas universidades de Europa, y posiblemente las mujeres más elegantes del planeta, también es la capital gastronómica del universo mundo. Tras almorzar *tortellini alla panna*, puede paladearse allí otra obra de precisión que deja asimismo buen sabor de boca: una gigantesca línea meridiana de latón, incrustada en el suelo de la catedral. La instaló Gian Domenico Cassini, el más célebre astrónomo en torno a 1668. Año en que su prestigio le granjeó una proposición de la mano derecha de Luis XIV, Jean-Baptiste Colbert, que no pudo rechazar: dirigir el nuevo observatorio de París. Enseguida se unió al gran proyecto nacional de determinar la forma de la Tierra (pues los franceses no creían que estuviera achatada por los polos).

Colbert necesitaba conocer tales arcanos para que la nueva Marina que estaba organizando pudiera establecer con más precisión la posición en alta mar a partir de los ángulos de las estrellas fijas (que diferían dependiendo de que la Tierra estuviese, o *no*, aplanada por los polos). De esta manera, los navíos franceses podrían navegar sin perder el norte. Amén de hacerse con el imperio de la mar océana. Y quién sabe, de darles una buena lección a los ingleses, birlándoles el meridiano principal y llevándoselo a París. Desgraciadamente para el *amour-propre*, estaban equivocados acerca de la forma del globo, motivo por el cual escribo esta columna a la hora del meridiano de Greenwich.



VLAD GUZNER

Las maquinaciones siderales eran pieza clave en el majestuoso plan de Colbert de convertir a Francia en superpotencia mercantil, pero el ministro eximió además de impuestos a cualquiera interesado en navegar (esperaba ahora que de manera más precisa) a tierras exóticas y volver con artículos de importación de alto precio. La idea era que ese comercio de lujo fuese un monopolio francés y engrosara las bolsas del rey y del país. Del rey más bien.

Este plan perfectamente legítimo de evadir impuestos era también una proposición difícil de rechazar. En un abrir y cerrar de ojos los bajeles de los filibusteros empezaron a descargar oro, marfil, esclavos y resina de Senegal. La resina de Senegal era justo lo que se necesitaba para estampar a máquina con colores rápidos el chintz, satinada cretona de inspiración india que en ese mismo momento hacía furor en Europa (la resina de Senegal sirve de agente fijador de colorantes). A mediados del siglo XVIII el irlandés Francis Nixon, el chico de los estampados, disponía de un método para producir todas las impresiones baratas que se quisieran, y a gran velocidad. El truco consistía en presionar dibujos en acero sobre rollos de cobre, colorear luego los rollos y hacer pasar el algodón entre ellos. Así nacieron las cortinas a juego con las colchas.

Pero sigamos. Hacia 1818, Jacob Perkins, de Newburyport (Estados Unidos), había introducido algunas modificaciones en el proceso de Nixon. Marchó a Londres para persuadir al Banco de Inglaterra de que le concedieran la contrata para imprimir unos billetes cuyos intrincados diseños, aseguraba, nadie podría copiar. En un tiempo récord (18 años) el banco le respondió que sí. (En fin, así *estaba* Inglaterra.) Cuatro años más tarde el paciente Perkins sacaba la lengua a todos sus competidores: suyo era el encargo de producir el "Penny Black", el primer sello de correos del mundo.

A los empresarios de doquiera se les pegó la idea de hacer negocio con eso de los sobres. En 1874, con motivo de la introducción del sello en Suiza, Berna se constituyó en sede de la Unión Postal Universal. La comunidad internacional clasificaba ya el correo en tres categorías: cartas, paquetes y algo en verdad nuevo, tarjeta postal lo llamaban.

Las ilustraciones de algunas de las primeras postales surgieron del lápiz de Phil May, caricaturista británico que realizó sus mejores trabajos para la célebre revista satírica *Punch*. En un principio, la revista no había previsto incluir ilustraciones, pero la vida presentó una de esas oportunidades con las que sueñan los editores. Cuando el príncipe Alberto, esposo de la Reina Victoria, abrió un concurso para decidir quién pintaría los frescos de los interiores del Parlamento (recién reconstruido como mandaban los cánones neogóticos del XIX), las propuestas que Su Alteza Real estimó mejores fueron tan ridículamente espantosas que no había más que una salida: publicarlas. Y funcionó.

Pero ni siquiera el *Punch* pudo frenar el resurgir neogótico. La próxima vez que visiten Gran Bretaña, fíjense en las muchas iglesias del XIX en cuya construcción original se mezclan gárgolas y luz de gas. El gótico era más barato que el neoclásico, de modo que los contratistas de la iglesia victoriana hicieron construir más de 500. La culpa, es un suponer, habría que achacársela a ese frenesí por el Medioevo que hoy llamamos romanticismo, cuya punta de lanza (¿captan el toque medieval?) fue un joven filósofo alemán —Johann G. Herder—, imbuido de la unidad fundamental de

la humanidad, de naturaleza, de folclore germánico y del espíritu del *Sturm und Drang*, épica visión de la existencia, para los criterios actuales un tanto... desmadrada.

Herder se había sentido atraído hacia esos excesos por la clamorosa llegada a Alemania, a finales del siglo XVIII, de una colección de poemas gaélicos escritos por el guerrero y poeta irlandés Ossian, del siglo III. En un abrir y cerrar de ojos subyugaron a toda Europa, y a Herder en particular. Para los románticos, en esas obras palpitaban los sentimientos más puros y vigorosos de un pueblo primitivo. Cosas así son las que forjan los grandes momentos de la historia.

Lástima que los poemas fueran falsos. Los "descubrió" un vate escocés de medio pelo, James Macpherson, quien juntó unas baladas recogidas en un viaje por Escocia con algunas de sus propias obras e hizo pasar el lote por traducciones de originales gaélicos de hacía 1500 años. Con todo, contribuyó al advenimiento del romanticismo, que nos trajo la patología y la radio (dejémoslo para algún otro día). Pero, para empezar, ¿por qué James Macpherson andaría coleccionando baladas antiguas? Quizá porque por entonces el futuro de la cultura escocesa se presagiaba sombrío.

Desde 1715, los Estuardos católicos pretendían el trono inglés (ocupado ahora por protestantes alemanes) recurriendo sin cesar a levantamientos armados. Los "casacas rojas" campaban por toda Escocia. Y una nimiedad, los clanes, la tela a cuadros o hablar la lengua del país, le podían dejar a uno ahorcado pero que de muy mala manera. Los ingleses incluso añadieron una línea a su himno nacional que dice algo sobre "aplastar a los rebeldes escoceses".

Se alcanzó el punto culminante en 1745, cuando el último heredero de los Estuardos, *Bonnie Prince Charlie*, y su "criminal horda de matarifes" (también apodada "hueste de bravos patriotas") penetraron profundamente hacia el sur, hasta Derby, lo que causó una devaluación de la libra. Pero con el Banco de Inglaterra no se juega y escapa luego uno sano y salvo. Y sin embargo, sano y salvo escapó. Como dice la balada, le tocó "Cruzar el mar hasta Skye", y luego el Canal para llegar al continente. Hasta el día de hoy, en memoria de la huida de Charlie al extranjero, los románticos escoceses brindan por "el rey del otro lado del mar".

Y para acabar, la razón por la que comencé de tal guisa esta salsa boloñesa. Pues, ¿dónde, si no, acabó Charlie gastando los mejores años de su decadencia en el exilio? ¿Adónde ir, si anhelaba tertulias intelectuales, la compañía de elegantes mujeres y los placeres de la comida y la bebida (que fueron los que finalmente le llevaron a la tumba)? Desde cualquier ángulo que se mire, sólo tenía una opción: Bolonia.

LIBROS

Ilustración

Entre la metafísica y la artillería

THE SCIENCES IN ENLIGHTENED EUROPE. Dirigido por William Clark, Jan Golinski y Simon Schaffer. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.

WHAT WAS MECHANICAL ABOUT MECHANICS. THE CONCEPT OF FORCE BETWEEN METAPHYSICS AND MECHANICS FROM NEWTON TO LAGRANGE, por J. Christiaan Boudri. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2002.

THE CORRESPONDENCE OF JOHN FLAMSTEED, THE FIRST ASTRONOMER ROYAL. Edición preparada por Eric G. Forbes et alii. Institute of Physics Publishing; Bristol, 2002.

THE LETTERS OF SIR JOSEPH BANKS. A SELECTION, 1768-1820. Edición preparada por Neil Chambers. Imperial College Press; Londres, 2000.

VIAGGI MINERALOGICI DI SPIRITO BENEDETTO NICOLIS DI ROBILANT. Edición preparada por Valeria Garuzzo. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2001.

Aún se lee, incluso en estudios que se pretenden especializados, que la época de la Ilustración fue una suerte de período sesteante entre la revolución científica del siglo XVII y el despliegue del decimonono. Como mucho, se le suele conceder el desarrollo del cálculo y, en sus postrimerías, la renovación de la química y el descubrimiento de la electricidad. Al paso de esa tesis envejecida salen la obra colectiva *The Sciences in Enlightened Europe* y la tesis doctoral de J. Christiaan Boudri *What Was Mechanical about Mechanics*.

Se ha admitir, por supuesto, que toda periodización de la historia de la ciencia adolece de obligada arbitrariedad. La división por siglos es puramente instrumental. Lo comprobamos con nitidez en *The Correspondence of John Flamsteed, the First Astronomer Royal*. En este tercer volumen, que recoge el epistolario de los años 1703-1719, etapa final de su vida, se advierte cierta relajación de la intensa actividad observacional en Greenwich, objeto de los dos tomos precedentes, aunque no menos empuje teórico. Presta aquí mayor atención a las relaciones con el exterior; le interesa, y ése es otro asunto dominante, la publicación de sus hallazgos. Pero observación y difusión de los catálogos estelares son dos procesos indisolubles para un astrónomo. Sobre todo para quien, como él, determinó la posición de unas 3000 estrellas con precisión de 10 segundo de arco. (Carlos II había nombrado en 1675 a Flamsteed primer astrónomo con el encargo de poner en funcionamiento el Real Observatorio de Greenwich.)

Por su voluntad de no publicar nada antes que no hubiera contrastado se enzarzó en agrias polémicas con otros científicos, Newton incluido, quien, presidente de la Regia Sociedad, optó por punto menos que requisarle los manuscritos en 1712. En el tono de las cartas se refleja ese ambiente tenso. Aunque importantes las dirigidas a Stephen Gray de Canterbury, eficaz colaborador que le aportó observaciones sobre los satélites de Júpiter, eclipses y manchas solares, el grueso de la correspondencia es con su ayudante Abraham Sharp (1653-1742). [En relación con éste aparecen las únicas referencias a España, que conciernen a la situación política: la guerra de Sucesión. Si Flamsteed creía en 1705 que el ejército inglés volvería pronto victorioso una vez que "algunos nobles españoles se habían pasado al bando del archiduque pretendiente", cuatro años más tarde Sharp se queja de la prolongación de la guerra, que tanto dinero se estaba llevando en detrimento de las empresas culturales.]

William Clark, Jan Golinski y Simon Schaffer destacan una triple dimensión en los nuevos enfoques sobre la ciencia del siglo XVIII: dominio de la racionalidad instrumental, papel mediador de la actividad humana y nueva conciencia geográfica, ejes sobre los que giran los apartados de esa obra plural, a saber, "cuerpos y técnicas", "hombre y naturaleza", "provincias y periferias". En su revisión historiográfica parten del cambio de rumbo operado en los años treinta del siglo pasado, gracias a los trabajos, por un lado, de Cassier y, por otro, de Horkheimer y Adorno.

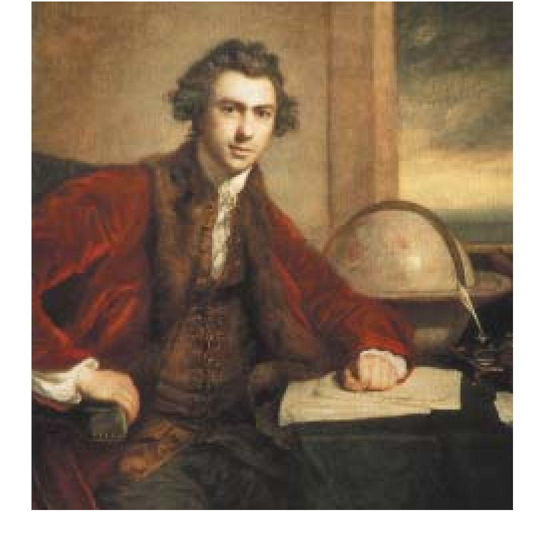
Ese cambio de agujas suponía abandonar la perspectiva positivista precedente que excluía la metafísica y la teología del pensamiento para ceñirse a la ciencia empírica. A Ernst Cassirer le interesaba la "mente de la Ilustración", como titulaba el primer capítulo de su *Die Philosophie der Aufklärung* ("Filosofía de la Ilustración"). Sostenía que ese movimiento, comenzado en Inglaterra y Francia para difundirse por el resto del continente, comprometía a toda la ciencia natural, la psicología, la teología, la historia, el derecho, la sociología y la estética, con la filosofía como punto general de incardinación. Por algo se apoyaba en el ensayo de Immanuel Kant *¿Qué es la Ilustración?* (1784). En su valoración del siglo XVIII, el progreso, la cultura, constituía una empresa de autoliberación del hombre.

A conclusiones polares llegaban Max Horkheimer y Theodor Adorno en su *Dialektik der Aufklärung* ("Dialéctica de la Ilustración"). Aunque opuestos también al positivismo, postulaban que la Ilustración se había desarrollado en el seno de formas de pensamiento y actitudes hacia la naturaleza que fueron las precursoras necesarias de los horrores del siglo XX. Desde su atalaya marxista, la ciencia y la técnica eran sistemas culturales asociados a las estructuras de poder.

No es preciso entrar en grandes debates interpretativos para apreciar que el siglo XVIII se nos ofrece preñado de avances reseñables de alcance general. Abarcan éstos desde

los catastros hasta las medidas de salud pública y la aplicación de la geometría y el cálculo al maquinismo incipiente. La aritmética poblacional, iniciada en la centuria precedente, no sólo facilitó un reparto equitativo de las cargas fiscales, al conocer la extensión real de las propiedades, sino que, asociada a la medicina, permitió hacerse una idea más completa de las enfermedades habituales o ligadas a determinados emplazamientos.

Esa atención médica al medio venía instada, además, por el neohipocratismo dominante, que vinculaba la salud a los "aires y las aguas". Medidas urbanísticas e higiénicas se conjugaban con el establecimiento de redes de relaciones entre médicos para compartir información sobre la incidencia y gravedad de determinadas enfermedades en condados o parroquias. Pionero en ese campo fue el médico James Jurin, quien en el primer tercio del siglo XVIII se interesó por la inoculación de la viruela y buscó métodos para evaluar la práctica. Sirviéndose de su cargo como secretario de la Regia Sociedad, Jurin solicitó informaciones sobre la inoculación a través de un anuncio insertado en las *Philosophical Transactions*.



Joseph Banks, retrato realizado por Joshua Reynolds en torno a 1772

Para acotar la influencia del medio, se atendió también a la meteorología, teórica e instrumental. Al barómetro como predictor médico. Se había observado que el mercurio del tubo oscilaba en respuesta a los cambios de aire, subiendo cuando la atmósfera era clara y serena, y hundiéndose cuando estaba cargada de nubes y vapores. Se ligó también su variación de nivel a los cambios del cuerpo humano. Las alteraciones operadas en el organismo debían entenderse de acuerdo con los nuevos descubrimientos físicos y fisiológicos; los cambios en la presión, se decía, podían afectar a la circulación de la sangre. En otro orden, el apogeo del barómetro como medio detector del tiempo aceleró el declive de la astrología.

Esa voluntad de poner razón a los fenómenos se plasma también, por ejemplo, en la búsqueda de explicación de los seres monstruosos. Si en el siglo XVII los monstruos se consideraban una rareza objeto de mofa o curiosidad, guardada en una vitrina de gabinete o expuesta en la feria, ahora se trata de ahormarlos en las categorías taxonómicas. Empezaron a considerarse supervivientes de formas embrionarias transitorias. El hombre no era la criatura cabal, perfecta. Había híbridos, medio hombres medio monos. La teoría preformacionista perdía terreno frente a la epigenética. Los monstruos, además, adquirieron singular importancia para la expansión de la patología y de la embriología.

Y fue el XVIII el siglo de la mecánica. Pero no newtoniana *tout court*, insiste Boudri en *What Was Mechanical about Mechanics*. Discrepa de la arraigada opinión de Mach y otros (incluidos Eduard Dijksterhuis,

Agresividad

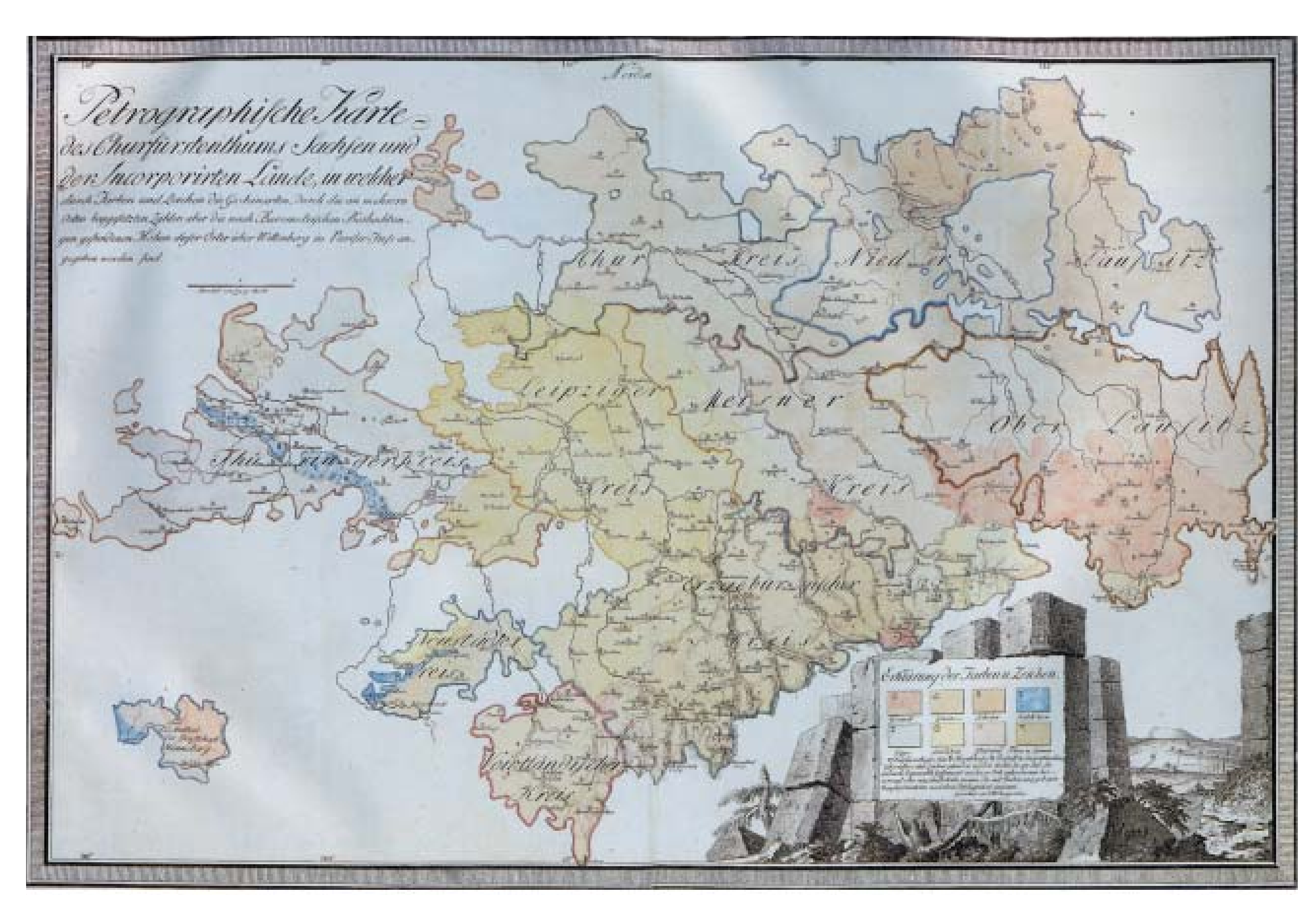
LA MENTE DE LOS VIOLENTOS, por José Sanmartín. Editorial Ariel; Barcelona, 2002.

En *La violencia y sus claves* José Sanmartín había mantenido "el ser humano es agresivo por naturaleza, pero violento por cultura". En este libro, clara continuación del anterior, trata de fundamentar esa tesis desde una visión integradora apoyada no en aproximaciones parciales, en el biologismo ramplón, en el papel de ciertas sustancias químicas... El autor encuentra que el centro neurálgico desde el que emanan las directrices para la acción de los diversos mecanismos responsables de la conducta agresiva es la amígdala. La amígdala unifica la respuesta agresiva pero también es el centro desde el cual se ordena que la respuesta agresiva cese. Esta afirmación la apoya en la existencia de dos vías de conexión tálamo-amígdala: la primera, más primitiva evolutivamente, provoca una respuesta directa de agresividad a las emociones perceptivas: la segunda, indirecta, tálamo-corteza-amígdala, va más lenta pero menos difusa y la corteza prefrontal hace llegar a la amígdala la emoción interpretada a la luz de ideas, pensamientos, sentimientos.

Es en la corteza prefrontal donde tiene lugar un hecho de profundas consecuencias para nuestra especie: la unión entre lo innato y lo adquirido, entre emoción y razón. Desde esta apoyatura se mantiene la tesis de que la agresividad es innata pero en todas las especies se encuentra en equilibrio; por el contrario, la violencia es la agresividad descontrolada resultante de la influencia de lo adquirido, de la razón sobre la emoción; "somos agresivos por naturaleza, pero violentos por cultura" (p. 132). La cultura es clave para poner en marcha o evitar la violencia, de aquí que los estudios tengan un valor fundamental: forman en el autocontrol y permiten el desarrollo de habilidades sociales para la interacción con los demás, por lo que constituyen un elemento central para el control de la violencia.

El libro está redactado en tono coloquial, con numerosos ejemplos de violencia y de puntos emocionales que lo hace especialmente atractivo. Lo que no implica que no tenga un rigor científico absoluto. Sabia mezcla de quien, Director del Centro Reina Sofía para el Estudio de la Violencia, lógico y filósofo de la ciencia, lleva años dedicado a un tema, la violencia, convertido en auténtica enfermedad del hombre occidental. Un libro que puede ayudar al optimismo que el tutor trata de establecer en sus ultimas líneas, optimismo que posibilite un mundo mejor gracias a un mayor conocimiento.

—Javier de Lorenzo



Mapa petrográfico

Edwin Arthur Burtt, Alexander Koyré, Thomas Kuhn y I. Bernard Cohen) según la cual la "philosophia naturalis" de la Ilustración se circunscribiría a elaborar o aplicar los *Principia mathematica*. Mach sentenció incluso que "los principios de Newton bastan para explicar cualquier caso mecánico, sin necesidad de ningún otro principio. Si aparecen dificultades durante ese proceso, son siempre de naturaleza formal, matemática, nunca de carácter fundamental".

Pero antes de la publicación de la *Méchanique analitique* de Lagrange y de la *Kritik der reinen Vernunft* de Kant, en la primera mitad de los años ochenta, los hombres de la Ilustración estaban convencidos de que participaban en el desarrollo de la ciencia, en su renovación. Había que completar lo que Newton inició y dar forma sistemática a lo que sólo esbozó. Leonhard Euler puso fundamento a la mecánica racional. Hubo más. Los grandes debates del siglo XVIII —medida de la fuerza viva o el principio de mínima acción, entre otros— sólo pueden entenderse si caemos en la cuenta de que en la mecánica de Newton, Leibniz, Euler, Maupertuis, d'Alembert o Lagrange hay algo más que mecánica.

Existió —es la tesis de Boudri— una dimensión metafísica, aunque parcial e implícita. En la superficie aparecía, sin embargo, un rechazo explícito y creciente del enfoque metafísico tradicional. Asistimos así a la convivencia de un concepto de fuerza entendida como sustancia y una parametrización de la misma en función del espacio y el tiempo. Acabó imponiéndose esta última: tiempo, masa y distancia se definen mediante una medida que no es otra cosa que una unidad reproducible de las mismas magnitudes (tiempo, masa y distancia). Con ello, al concepto básico pertinente se le asigna un valor, pero el contenido del concepto se nos hurta.

Porque la mecánica fue la primera ciencia natural que recibió un tratamiento matemático, la más extensamente matematizada y modelo de matematización para las demás (óptica y electricidad), es por lo que encuentra mayor resistencia la búsqueda de los supuestos metafísicos sobre los que procede. Pero el hecho es que, hasta bien entrado el siglo XVIII, el concepto de fuerza se aplicaba a fenómenos muy diversos, que, andando el tiempo, se diferenciarían en energía, peso, cantidad de movimiento, etcétera. Y eso no obedecía a ninguna confusión mental, sino a una atención mayor a las semejanzas que a las diferencias: admitíase una unidad subyacente bajo los diversos significados, unidad que se heredó del concepto sustancial de fuerza.

Si la metafísica constituía el sustrato o suelo donde enraizó la mecánica, las ramificaciones del árbol de la ciencia, básica y aplicada, fue otra característica de la Ilustración. En el segundo aspecto, en particular, el impulso procedió del poder (*The Letters of Sir Joseph Banks* y *Viaggi Mineralogici di Spirito Benedetto Nicolis di Robilant*). Joseph Banks lo tuvo, de un modo casi absoluto, en Inglaterra. Famoso es su viaje alrededor del mundo, de

1768 a 1771, a bordo del *H.M.S. Endeavour*, llevando consigo, y a sus costas, un equipo de naturalistas y dibujantes. Agavillaron, de los lugares donde recaló el barco, colecciones únicas de flora y fauna. Presidió también, en 1772, la primera expedición científica británica a Islandia.

Heredero de una inmensa fortuna, supo ponerla al servicio de su inteligencia y ésta al de su país. Durante 41 años estuvo al frente de la Regia Sociedad y fue miembro fundador de la Sociedad Linneana, la Regia Institución y la Sociedad de Horticultura, entidades de brillante historia posterior. Bajo su dirección florecieron los Reales Jardines Botánicos de Kew, donde se acometieron proyectos de aclimatación. Este último afán de convertir la botánica de observación en botánica aplicada a la agricultura, trasladando las especies, primero a la metrópoli y luego a los dominios de ultramar, repercutió de una manera grave en los intereses españoles. No en la agricultura, sino en la ganadería y en la industria pañera.

En carta del 30 de septiembre de 1788 le escribe a Thomas March, afincado en Lisboa, animándole a sacar de España, a través de Portugal, ovejas de las principales razas laneras: Patrimonio, Perales o Lasteri. Siguió el proceso con especial interés en colaboración con John Maitland. Tras aclimatar la merina en Inglaterra y repartirla por todo el país, envió lotes a Nueva Gales del Sur, de cuyo éxito vive todavía Australia.

No vio, sin embargo, cumplido su deseo de publicar el *Florilegium Endeavour*, un proyecto de 14 volú-

Estación Espacial

CREATING THE INTERNATIONAL SPACE STATION, por David M. Harland y John E. Catchpole. Springer-Praxis; 2002.

El 16 de diciembre de 1994, Viktor Chernomidyn, primer ministro ruso, y Al Gore, vicepresidente de EE.UU., firman en Moscú un acuerdo por el que Rusia se constituye en socio pleno del programa para la construcción de la que se había dado en llamar Estación Espacial Internacional Alfa. Podría decirse que este hecho constituye una suerte de divisoria de las aguas en lo que atañe a la peripecia que desemboca en el inicio de la construcción de la Estación Espacial Internacional.

Pero, ¿qué había pasado antes? ¿Y qué pasó después y está pasando ahora? Este es el tema de *Creating...* Los antecedentes más lejanos, comunes a ambas potencias espaciales, hay que buscarlos en los momentos más álgidos de la Guerra Fría, en que la carrera hacia la Luna estaba en las voluntades de EE.UU. y la entonces Unión soviética, o más bien las dominaba. Por parte del primero esa voluntad se concretó en el programa Apolo que acabó materializando la presencia del hombre en nuestro satélite; por parte del segundo, en la puesta en órbita de un hombre en torno a la Tierra a bordo de un satélite artificial, momento a partir del cual la actividad soviética tomó otros derroteros. Sin embargo, ambos sabían que realmente la carrera hacia la Luna no era sino una primera fase de la más larga carrera hacia el espacio, y que ésta pasaba por la construcción de una base, o estación, a órbita baja. En EE.UU. la secuela más importante de la carrera a la Luna fue el Skylab, ya de por sí una estación; en la Unión Soviética, la construcción de los vehículos Soyuz y Salyut, que al igual que Skylab se emplearon en los primeros estudios para asegurar la presencia del hombre en el espacio ultraterrestre, y otras tareas de interés científico. Hubo unos años que ambos dedicaron también al perfeccionamiento de las maniobras de los vehículos espaciales, y más concretamente del acoplamiento.

A principios de la década de 1970, la voluntad norteamericana de construir una estación espacial de mayor tamaño se plasma, de momento tácitamente, en la construcción del transbordador, o lanzadera, espacial, para conseguir un acceso rutinario, y más económico que los cohetes de un solo uso, a las órbitas bajas. Su primer vuelo se realiza en abril de 1981. Se empleó entonces en misiones de investigación y para la repetida puesta en órbita del módulo europeo Spacelab.

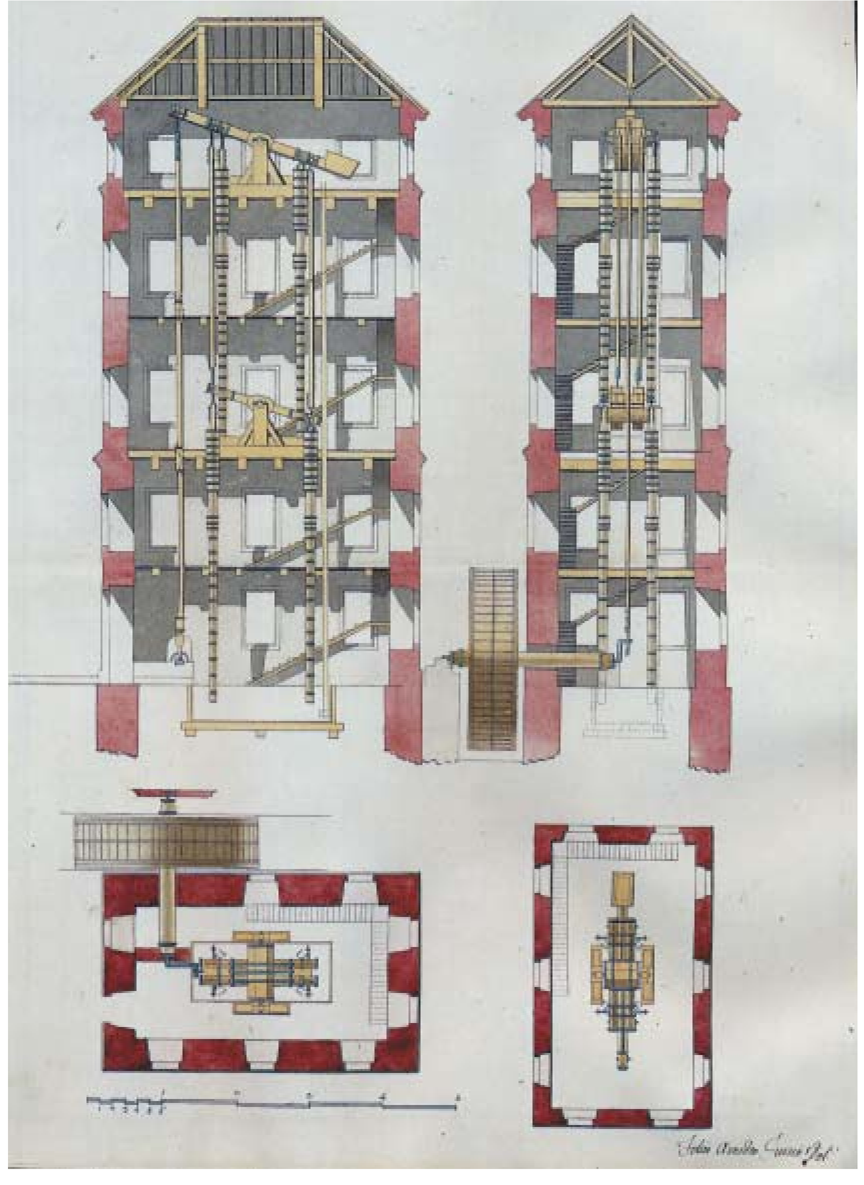
Por su parte, los soviéticos deciden construir un "bloque básico", que una vez en órbita sirviera de base para ensamblar un complejo mayor formado por componentes modulares. Ese vehículo fue puesto en órbita en febrero de 1986 y en realidad se hubiera llamado Salyut-8, si no se hubiera decidido rebautizarlo como Mir.

En 1984, tras años de estudios y planes y rechazos, con Ronald Reagan en la presidencia de EE.UU., se aprueba la construcción del sucesor de Skylab, que entonces recibió el nombre de Estación Espacial Freedom. Sería una estación de gran tamaño, muy compleja y muy cara, pese a la contribución de los socios europeos, canadienses y japoneses, y cuyo ensamblado duraría años. Durante los diez años siguientes, el proyecto no pasó de los tableros de dibujo.

El 31 de julio de 1991, con la Guerra Fría ya prácticamente superada, los presidentes George Bush y Mijail Gorbachov firman el acuerdo que serviría de base para la cooperación Shuttle-Mir, que se inició con un intercambio de astronautas (EE.UU.) y cosmonautas (Rusia) y se prolongó durante los años siguientes con misiones conjuntas, hasta la fecha del 16 de diciembre de 1994 en que Rusia se incorpora plenamente al programa de la Estación Espacial Alfa, con la participación de europeos, canadienses y japoneses. Alfa se trata de un rediseño del primitivo proyecto Freedom que había encallado por razones presupuestarias.

Y este es el resumen de lo que había pasado antes del 16 de diciembre de 1994. Al igual que otros textos de la serie "Libros de Astronomía y de Ciencias Espaciales" de Springer-Praxis, *Creating* es esencialmente un libro de historia. El relato del desarrollo de los acontecimientos cubre con detalle suficiente, en su primera mitad, los aspectos políticos y, por supuesto, los económicos de cada hecho y circunstancia, y los aspectos técnicos se tratan con la sencillez necesaria para hacer la lectura asequible a cualquier lector.

Aproximadamente la mitad de las casi 400 páginas de *Creating* están dedicadas a "lo que había pasado antes". La otra mitad, los capítulos 12 y 13, está dedicada a lo que pasó y está pasando después. La señal para iniciar los trabajos puede considerarse que se da en enero de 1995 con la firma de los primeros contratos. La fecha clave es el 20 de noviembre de 1998 con el lanzamiento del primer módulo ruso Zarya desde el cosmódromo de Baikunor. El capítulo 13 y último es una exposición clara y pormenorizada de lo acontecido desde entonces hasta la fecha de publicación del libro en 2002. *—J. Vilardell*



Planta y perfiles de un torre de bombeo en Arthern

menes, con láminas espectaculares, donde se explicaran las distintas especies observadas en su viaje. Pensaba ordenarlas de acuerdo con el sistema lineano que había aprendido de los mismos labios de Solander, uno de los discípulos dilectos de Carl von Linné. [Las láminas pueden contemplarse todavía en el Museo de Historia Natural de Londres.]. Quizás abarcara demasiado: se interesa, en carta a William Hamilton, por los filamentos de roca volcánica vítrea tras la erupción reciente del Vesubio; pondera en otra el reciente descubrimiento del séptimo planeta solar por William Hersechel en 1781 o escribe de aerostática con Benjamin Franklin.

En una escala mucho menor, aunque no menos significativa, operó Spirito Benedetto Nicolis di Robilant, cuyos *Viaggi Mineralogici* ha rescatado Valeria Garuzzo en una magnífica edición subvencionada por el Centro de Investigaciones sobre escritos de la ciencia y la industria del Piamonte. En una documentada presentación la autora recrea la situación de la protoindustria saboyana durante la segunda mitad del Setecientos. Las relaciones del viaje comprenden cuatro volúmenes de unas 500 páginas cada uno, más un quinto volumen de cuadros.

Acompañado por los cadetes Ponzio, Bussoletti, Vallino y Fontana, el capitán Nicolis de Robilant, a la sazón de 24 años, recorrió entre 1749 y 1751 Sajonia, Hercinia, Hungría, Bohemia, Estiria, Carintia y Tirol para estudiar sus yacimientos mineros y metalúrgicos con el fin de aplicar lo aprendido en una gran fundición a instalar en los Estados Sardos. El proyecto se inscribía en el reformismo moderado de Carlo Emmanuele III y su ministro, conde Bogino, empeñado en seguir el ejemplo francés de creación de escuelas de artillería y fomento de la industria de guerra. La elaboración del hierro y del bronce, materia prima del armamento, se sumaba a la normalización de calibres, símbolo de la precisión mecánica.

Hasta mediados del siglo XVIII se dependía de empresas extranjeras, alemanas en Cerdeña e inglesas en Saboya, sin contar con los técnicos venidos de fuera que trabajaban en las minas del valle de Sesia y del valle de Aosta. Para liberarse de esa servidumbre se organizó el viaje. Sería el primer mojón para un plan más ambicioso que incluía la implantación de las industrias emergentes del vidrio y la porcelana. Partían los expedicionarios con la preparación común en las escuelas de artillería, es decir, la adquirida en los tratados de la época: *L'Art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu* de R. A. Ferchault, *De Cupro et Oricalco* y *De Ferro* de Emanuel Swedemborg y *Architecture hidraulique* de Bernard Forest de Bélidor.

Nicolis di Robilant, además de detallar los procesos de fundición y separación de minerales, pormenoriza las tareas y métodos, la distribución del trabajo y la organización de las fundiciones. Le llama la atención el sistema de plomización, que permitía separar la plata del cobre por medio del plomo: se calcinaba el mineral con el añadido de plomo, que formaba aleación con la plata, obteniendo la "escoria", que se fundía y reducía a plomo argentífero; luego, los minerales se separaban en un proceso de "evaporación", de oxidación del plomo y consiguiente liberación de la plata. Otros procesos observados fue la obtención de zinc separándolo de los metales en que aparecía incrustado; la separación del oro por vía seca y la elaboración de la sal. —LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Billar perfecto

Estamos jugando al billar americano, o billar de troneras, en una mesa de tres metros de larga y uno de ancha. Es perfecta: cuando una bola hace impacto en una banda, el ángulo de incidencia es exactamente igual al ángulo de reflexión. Se supone, por conveniencia, que está orientada de modo que sus lados largos corran de oeste a este y los cortos, de sur a norte (como es habitual al usar unos ejes de coordenadas). La posición de cada bola se denota (x, y), donde (x) es la distancia hacia el este desde el ángulo sudoeste e y es la distancia hacia el norte con respecto a ese mismo vértice. La mesa tiene una boca en cada ángulo; no las tiene, en cambio, en las bandas.

Supongamos que se desea que una bola situada en (2, 0) entre en la boca situada en la boca sudoeste —es decir, en la posición (0, 0)— y que otra bola impide un tiro directo. La opción más sencilla parece que sería impulsarla hacia la banda opuesta, como se indica en la ilustración *a*. Bastará dirigir la bola hacia el noroeste (una pendiente de –1); tras tocar la banda en el punto (1, 1) rebotará y se deslizará en la boca situada en (0, 0). Es fácil conseguir el mismo resultado jugando a tres bandas. Se tira hacia el nor-noroeste (con una pendiente de –2), como se indica en la ilustración (*b*). La bola rebotará en los puntos de coordenadas ($1^1/_2$, 1), (1, 0) y ($^1/_2$, 1) antes de colarse por la tronera.

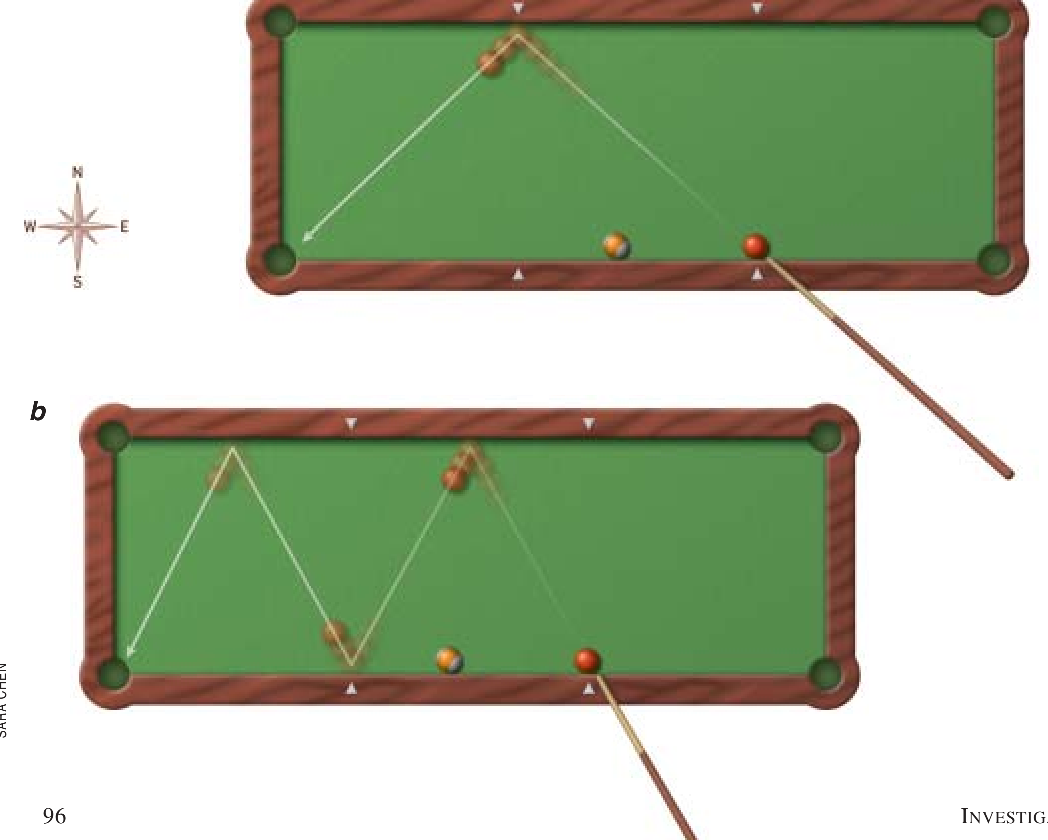
Ahora, ¿será posible meter la bola tocando exactamente dos bandas? Imaginemos que alguien está dispuesto a apostar una suma considerable, afirmando que no es usted capaz de semejante carambola. ¿Con qué pendiente se debería golpear la bola?

Solución del problema del mes pasado:

El espía selecciona al azar dos números primos grandes y facilita a los guardias fronterizos el producto de estos dos números. A su regreso, el espía le da al guardia los dos números primos; el guardia los multiplica y comprueba que su producto coincide con el que le fue dado al salir. Incluso aunque el guardia revelase el producto, no habría forma práctica de que los adversarios determinasen los factores primos, si tal factorización fuese verdaderamente difícil. Puede verse una explicación más completa en www.investigacionyciencia.es

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SARA CHEN

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LAS EXPLOSIONES MAS BRILLANTES DEL UNIVERSO, por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard

Cada vez que detona una explosión de rayos gamma, nace un agujero negro.

LA ENFERMEDAD DE HUNTINGTON, por Elena Cattaneo, Dorotea Rigamonti y Chiara Zuccato

Diez años después de la identificación del gen responsable de la enfermedad de Huntington, seguimos sin conocer los mecanismos de que se vale para producir efectos tan destructivos.

¿SOBRE HIELO QUEBRADIZO?, por Robert A. Bindschadler y Charles R. Bentley

Si la capa de hielo de la Antártida Occidental se fundiese de repente, anegarían la Tierra inundaciones catastróficas. Corresponde a la ciencia, y en ello está, determinar los factores que controlan el tamaño de dicha cubierta y su velocidad de desintegración.

ALIMENTACION Y MENTE, por William R. Leonard

En el cambio en el régimen de dieta se esconde una de las fuerzas promotoras de la evolución humana.

IBN SAHL, INVENTOR DE LA LEY DE LA REFRACCION DE LA LUZ, por Brahim Guizal y John Dudley

Un manuscrito revela que Ibn Sahl, un matemático árabe, había descubierto la "ley de Descartes" ya en el siglo X.

ORDEN EN EL CAOS DE POLLOCK, por Richard B. Taylor

El análisis computarizado está ayudando a explicar el atractivo de las pinturas de Jackson Pollock. Los famosos escurridos y espirilos de este artista crean motivos fractales, similares a los que árboles, nubes y costas forman en la naturaleza.

GENETICA E HISTORIA DE LAS POBLACIONES DE NORTE DE AFRICA Y LA PENINGULA IBERICA, por E. Bosch, F. Calafell, S. Plaza, A. Pérez-Lezaun, D. Comas y J. Bertranpetit

El análisis genético ha revelado que los amplios intercambios culturales producidos entre el Magreb y la península Ibérica no conllevaron grandes intercambios de poblaciones.

LOS INSECTOS: UN EXITO DE LA EVOLUCION, por André Nel

Los insectos han conocido tres grandes explosiones evolutivas: han desarrollado las alas, después la metamorfosis y finalmente han inaugurado la vida en sociedad. Representan el 85 por ciento de la diversidad animal.

